

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA,
METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA**

UNIDAD DE POSTGRADO

Pucamarca:

**nuevo yacimiento epitermal de oro de alta sulfuración en el sur
del Perú**

TESIS

**para optar el grado académico de Magíster en Geología con Mención en
Minas y Recursos Energéticos**

AUTOR

Félix Toribio Cerón Cáceres

Lima – Perú

2010



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

UNIDAD DE POSGRADO

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos Lima, a los veinticuatro días del mes de junio del 2010, siendo las 11.30 horas, se reúnen los suscritos miembros del JURADO EXAMINADOR DE TESIS, nombrado mediante Dictamen N.º 32/UPG-FIGMMG/2010 del 15 de junio del 2010, con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«PUCAMARCA: NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ»

Que presenta el Bachiller FELIX TORIBIO CERON CACERES para optar el Grado de Magíster en Geología con mención Minas y Recursos Energéticos.

El secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente N.º 244 del 06/noviembre/2006, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas del trámite según el «Reglamento de los Estudios de Maestría» (Art. 06)

Luego de la Sustentación de la Tesis, los miembros del Jurado Examinador procedieron a aplicar la escala descrita en el Art. 8 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

Aprobado por Unanimidad

Habiendo sido aprobada la sustentación de la tesis, el Presidente recomienda a la Facultad que se le otorgue el Grado Académico de Magíster en Geología con mención Minas y Recursos Energéticos al Bachiller FELIX TORIBIO CERON CACERES

Siendo las 12.30 horas, se dio por concluido al acto académico

DR. NÉSTOR ITALO CHACÓN ABAD
Presidente

DRA. LAILA MARÍA LAU LUYO
Secretaria

MG. ALFREDO MATÍAS HUAMANI HUACCAN
Miembro

MG. MIGUEL AGUSTÍN RIVERA FEIJOO
Miembro

MG. PEDRO HUGO TUMIALÁN DE LA CRUZ
Asesor

DEDICATORIA

*A mis tres hijas: Yeria, Madián y
Chalmy, compañeras de estudios.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos quienes han colaborado en ésta tarea. Especialmente a mi Asesor, Ing. Pedro Hugo Tumialán de la Cruz quien con su calor profesional ha instado a no flaquear y continuar; y a mi Profesora, Dra. María Lau Luyo, por su valiosa colaboración.

A mis amigos que siempre me han acompañado para llevar a buen término mi maestría.

A mi esposa Jacqueline, por comprender en muchas ocasiones mis múltiples actividades y ser una persona que ha apoyado mi desarrollo profesional.

INDICE GENERAL

RESUMEN

INTRODUCCIÓN	1
---------------------------	----------

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTACIÓN DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento del problema	4
1.2. Justificación	5
1.3. Hipótesis	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. Variables	7
1.5.1. Identificación de variables	7
1.5.1.1. Variable independiente	7
1.5.1.2. Variables dependientes	7

CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas	8
2.1.1. Yacimientos auríferos epitermales	8
2.1.2. Yacimientos de alta sulfuración en el sur del Perú	9
2.2. Antecedentes	9
2.3. Descubrimiento de yacimiento aurífero Pucamarca	10
2.3.1. Ubicación geográfica y accesibilidad	10

CAPITULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación	12
3.2. Instrumentos	12
3.3. Procedimientos	13

CAPITULO 4: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Geografía regional	15
4.1.1. Relieve	15
4.1.2. Clima	15
4.1.3. Población	15

4.1.4. Agricultura	16
4.1.5. Ganadería	17
4.1.6. Comercio é industria	17
4.1.7. Vías de comunicación	17
4.1.8. Hidrografía	17
4.1.9. Suelos	18
4.2. Geomorfología	18
4.2.1. Pampas costaneras	19
4.2.2. Flanco disectado de los Andes	19
4.2.3. Superficie de Huaylillas	20
4.2.4. El Altiplano	20
4.3. Estratigrafía	20
4.3.1. Generalidades	20
4.3.2. Precambriano	22
4.3.2.1. Complejo Basal de la Costa	22
4.3.3. Triásico	22
4.3.3.1. Formación Machani	22
4.3.4. Jurásico inferior-medio	22
4.3.4.1. Formación Junerata	22
4.3.4.2. Formación Pelado	22
4.3.5. Jurásico medio	23
4.3.5.1. Formación San Francisco	23
4.3.6. Jurásico superior	23
4.3.6.1. Grupo Yura-Formación Ataspaca	23
4.3.7. Cretáceo inferior	23
4.3.7.1. Grupo Yura-Formación Chachacumane	23
4.3.7.2. Grupo Toquepala-Formación Chulluncane	23
4.3.8. Cretáceo superior	24
4.3.8.1. Grupo Toquepala-Formación Toquepala	24
4.3.9. Terciario-Paleoceno-Eoceno	24
4.3.9.1. Grupo Toquepala- Formación Tarata	24
4.3.10. Terciario-Eoceno-Oligoceno	24
4.3.10.1. Formación Huilacollo	24
4.3.11. Terciario-Mioceno	25

4.3.11.1. Grupo Chachani-Formación Moquegua	25
4.3.12. Terciario-Plioceno	25
4.3.12.1. Grupo Chachani-Formación Huaylillas	25
4.3.12.2. Grupo Chachani-Formación Barroso	25
4.3.12.3. Grupo Chachani-Formación Maure	26
4.3.13. Cuaternario-Pleistoceno	26
4.3.13.1. Depósitos fluvioglaciares	26
4.3.13.2. Depósitos aluviales	26
4.3.14. Cuaternario-Holoceno	26
4.3.14.1. Depósitos aluviales	26
4.3.14.2. Depósitos de ceniza	27
4.4. Petrología y rocas ígneas	27
4.4.1. Generalidades	27
4.4.2. Granodiorita	27
4.4.3. Monzonita	32
4.4.4. Diorita	32
4.4.5. Pórfido andesítico	32
4.4.6. Riolita	33
4.4.7. Pórfido de cuarzo	33
4.5. Aspectos estructurales	33
4.5.1. Generalidades	33
4.5.2. Sistema de Fallas Incapuquio	35
4.5.2.1. Falla Incapuquio	35
4.5.2.2. Falla Challaviento.....	35
4.5.2.3. Falla Bellavista.....	36
4.5.3. Sistema de Fallas Norte-Sur.....	36
4.6. Geología del yacimiento.....	36
4.6.1. Generalidades.....	36
4.6.2. Litología.....	39
4.6.2.1. Volcánico Huilacollo.....	39
4.6.2.2. Pórfido andesítico.....	43
4.6.2.3. Pórfido de cuarzo - Pórfido brecha –Brecha híbrida ..	43
4.6.2.4. Tufo brecha.....	49
4.6.2.5. Tufo fragmental.....	49

4.6.2.6. Tufisita.....	50
4.6.3. Estructuras.....	51
4.6.4. Alteración hidrotermal.....	52
4.6.4.1. Sílice masiva.....	54
4.6.4.2. Sílice masiva-oquerosa.....	55
4.6.4.3. Sílice oquerosa.....	55
4.6.4.4. Argílica avanzada.....	56
4.6.4.5. Argílica.....	57
4.6.4.6. Propílica.....	57
4.6.5. Mineralización.....	57
4.6.5.1. Relación de la mineralización con la alteración hidrotermal	71
4.6.5.2. Relación de la mineralización con la litología	71
4.6.5.3. Relación de la mineralización con las estructuras.....	75
4.7. Ubicación del yacimiento epitermal de Pucamarca dentro de un estilo de alta sulfuración	75
4.7.1. Ambiente estructural.....	76
4.7.2. Tamaño.....	76
4.7.3. Mineralogía económica.....	76
4.7.4. Mineralogía de ganga.....	76
4.7.5. Alteración.....	77
4.7.6. Ph.....	77
4.7.7. Textura.....	77
4.7.8. Conclusión.....	77
4.8. Estudio comparativo del yacimiento Pucamarca con otros similares en el Perú y el mundo	78
4.8.1. Generalidades.....	78
4.8.2. Modelo conceptual para yacimientos epitermales auríferos- argentíferos en diatremas volcánicas.....	79
4.8.2.1. Marco litológico.....	80
4.8.2.2. Controles estructurales.....	81
4.8.2.3. Terminología y descripción de las mineralizaciones	82
4.8.2.4. Estilo ó forma de mineralización y texturas	85
4.8.2.5. Consideraciones geoquímicas.....	86

4.8.3. Esbozo del modelo hipotético de construcción de la diatrema Pucamarca	89
4.8.4. Comparación de las mineralizaciones de Pucamarca con otros yacimientos auríferos similares en el Perú y el mundo	90
4.8.4.1. Rasgos geológicos del yacimiento epitermal de Quicay	90
4.8.4.2. Rasgos geológicos del yacimiento de epitermal de Marcapunta	96
4.8.4.3. Rasgos geológicos del yacimiento epitermal de Kelian Gold Mine	101
4.8.4.4. Rasgos geológicos del yacimiento epitermal de Rosia Montana	102
4.8.4.5. Relación estructural (geometría).....	109
4.8.4.6. Litología.....	109
4.8.4.7. Control tectónico.....	109
4.8.4.8. Alteraciones hidrotermales.....	110
4.8.4.9. Mineralogía.....	110
4.8.5. Discusión.....	110
4.8.5.1. La litología intrusiva relacionada a vulcanismo.....	112
4.8.5.2. El control tectónico.....	112
4.8.5.3. La geoquímica de los fluidos.....	112

CAPITULO 5: PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Resultados y discusión en función del objetivo general.....	113
5.2. Resultados y discusión en función del primer objetivo específico.....	113
5.3. Resultados y discusión en función del segundo objetivo específico..	115
5.4. Resultados y discusión en función del tercer objetivo específico..	116

CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.....	118
6.2. Recomendaciones.....	119

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
--	------------

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1

Análisis por elementos químicos principales en rocas de la diatrema Pucamarca	54
--	----

Tabla 2

Análisis de elementos traza en rocas de la diatrema Pucamarca....	70
---	----

Tabla 3

Minerales de mena en yacimientos auríferos de alta, intermedia y baja sulfuración (frecuencia de abundancia)	84
---	----

Tabla 4

Minerales de ganga en yacimientos auríferos de alta, intermedia y baja sulfuración (frecuencia de abundancia)	85
--	----

Tabla 5

Rasgos geológicos importantes de los yacimientos epitermales Quicay, Marcapunta, Kelian Gold Mine y Rosia Montana, comparados con los de Pucamarca	111
--	-----

RELACIÓN DE FIGURAS

- Fig.1** Plano de ubicación
- Fig.2** Columna geológica generalizada del área
- Fig.3** Magmatismo y yacimientos epitermales en los Andes del sur del Perú
- Fig.4** Depósitos epitermales en los Andes del sur del Perú.
- Fig.5** Geología regional
- Fig.6** Sección geológica A-A' (geología regional)
- Fig.7** Imagen satelital
- Fig.8** Vista del cerro Checocollo
- Fig.9** Vista panorámica del Proyecto Pucamarca
- Fig.10** Geología local
- Fig.11** Sección geológica A-A'(geología local)
- Fig.12** Sección geológica B-B'(geología local)
- Fig.13** Estudio petrográfico de la muestra M N° 12
- Fig.14** Estudios petrográficos de la muestra DDH-45 (157.5 m)
- Fig.15** Estudios petrográficos de la muestra DDH-29 (206.0 m-208.0 m)
- Fig.16** Estructura local
- Fig.17** Estudio minerográfico de la muestra DDH-29 (206.0 m-208.0 m).
- Fig.18** Estudio minerográfico de la muestra DDH-29 (206.0 m-208.0 m).
- Fig.19** Estudio microanalítico de la muestra DDH-29 (206.0 m-208.0 m).
- Fig.20** Estudio microanalítico de la muestra DDH-29 (206.0 m-208.0 m).
- Fig.21** Estudio microanalítico de la muestra DDH-29 (206.0 m-208.0 m).
- Fig.22** Estudio microanalítico de la muestra DDH-29 (206.0 m-208.0 m).
- Fig.23** Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.5 m)
- Fig.24** Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.5 m)
- Fig.25** Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.5 m)
- Fig.26** Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.5 m)
- Fig.27** Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.5 m)
- Fig.28** Alteración hidrotermal

- Fig.29** Sección A-A' -alteración mineralización
- Fig.30** Sección B-B' - alteración mineralización
- Figs.31, 32, 33 y 34** Esbozo del modelo hipotético de construcción de la diatrema Pucamarca
- Fig.35** Plano geológico regional (yacimiento epitermal Quicay)
- Fig.36** Mapa geológico de reconocimiento del yacimiento epitermal Quicay
- Fig.37** Sección idealizada E-W (Quicay)
- Fig.38** Localización y mapa geológico de Cerro de Pasco-región Marcapunta-Colquijirca
- Fig.39** Mapa geológico del depósito epitermal de Kelian Gold Mine
- Fig.40** Secciones geológicas en el depósito epitermal de Kelian Gold Mine
- Fig.41** Mapa esquemático de la zona del suroeste europeo
- Fig.42** Mapa geológico próximo al depósito epitermal Au-Ag de Rosia Montana
- Fig.43** Sección geológica esquemática del epitermal Au-Ag de Rosia Montana
- Fig.44** Mapa geológico generalizado del tajo abierto de Cetate en el epitermal Au-Ag de Rosia Montana
- Fig.45** Equipo técnico que dirigió el Proyecto Pucamarca (foto)

PUCAMARCA: NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ

RESUMEN

La franja volcánica del sur del Perú, enmarcada dentro del arco magmático principal en los Andes Peruanos presenta un interesante potencial aurífero epitermal, cuyas manifestaciones son los actuales yacimientos auríferos epitermales de alta sulfuración de Aruntani y Huilacollo . Es en este contexto que a partir de lo investigado en la revisión bibliográfica y de campo, surge nuestra motivación para investigar a profundidad las características del yacimiento aurífero de Pucamarca; específicamente en tres áreas de interés.

Primero, describir a profundidad las características de yacimiento aurífero de Pucamarca, ubicándolo previamente en un ámbito regional incluyendo las siguientes áreas temáticas: Geografía, estratigrafía, petrología y rocas ígneas y finalmente aspectos estructurales.

Segundo, poder reconocer las características de este yacimiento como pertenecientes a un modelo de estilo epitermal de alta sulfuración alojado en una diatrema.

Tercero, si bien este tipo de yacimiento no ha sido estudiado profundamente en la zona sur del Perú, nos interesa el poder situarlo en un contexto de estudio y comparación con otros yacimientos auríferos epitermales alojados en diatremas en el Perú y el mundo. Centrándonos de manera específica en los yacimientos de Quicay (Perú); Marcapunta (Perú); Kelian Gold Mine (Indonesia) y Rosia Montana (Rumania).

Análisis global, que nos permite aportar a la construcción del conocimiento geológico sobre la variedad y potencial aurífero que existe en la franja volcánica cenozoica del sur del Perú.

Palabras Clave: Franja volcánica del sur del Perú, aurífero epitermal, alta sulfuración y diatrema.

PUCAMARCA: NEW DEPOSIT EPITHERMAL OF ALTA'S GOLD SULFURATION IN THE SOUTH OF PERU

SUMMARY

The volcanic band of the south of Peru, framed inside the principal magmatic arch in the Peruvian Andes, presents an interesting auriferous epithermal potential, whose manifestations are the current auriferous epithermal deposits of high sulfuración of Aruntani and Huilacollo.

Is in this context that from the investigated in the bibliographical review and field exploration, that arises our motivation to investigate deeply the characteristics of Pucamarca's auriferous deposit; specifically in three areas of interest.

Firstly, to describe deeply the characteristics of Pucamarca.'s auriferous deposit, locating it before in a regional area including the following thematic areas: Geography, stratigraphy, petrology and igneous rocks and finally structural aspects.

Secondly, to be able to recognize the characteristics of this deposit like belonging to a model of epithermal style of high sulfuration lodged in a diatrema.

Thirdly, though this type of deposit has not been studied deeply in the south zone of Peru, we are interested in being able to place it in a context of study and comparison with other auriferous epithermal deposits lodged in diatremas in Peru and the world. Being focus in a specifcly on Quicay's deposits (Peru); Marcapunta (Peru); Kelian Gold Mines (Indonesia) and Rosia Montana (Romania).

This global analysis, allows us to reach to the construction of the geological knowledge related to the variety and auriferous potential that exists in the volcanic cenozoic band of the south of Perú.

Key words: Volcanic band of the south of the Perú, auriferous, epithermal, high sulfuration and diatreme.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación ha sido desarrollado a partir de los trabajos de exploración en el sur del Perú, realizados por la empresa MINSUR S.A.

La superficie estudiada abarca un área de 34,000 hectáreas que tiene como límites aproximados hacia el norte al poblado de Caplina en la coordenada 8046,000 N; hacia el este el vecino país de Chile, hacia el sur el poblado de Vilavilani con la coordenada 8024,000 N y hacia el oeste el poblado de Palca con la coordenada 388,500 E.

En agosto del 2001 se iniciaron los trabajos de prospección geoquímica de sedimentos fluviales en el sureste de Tacna, limítrofe con el vecino país de Chile, en observación de que esta área se mantenía inexplorada a pesar de ser parte de una franja mineralizada importante (Loayza, Dante.2004).

Estos estudios indicaron débiles anomalías por cobre en las cercanías del cerro Checocollo; identificando posteriormente el origen de la misma que se ubicaba en el mismo cerro mencionado. La exploración diamantina ejecutada luego definió los rasgos geológicos en profundidad, como son litología alteración y mineralización.

De esta manera que la empresa MINSUR SA ubica esta zona y la determina como área de interés por lo cual el año 2002 comenzó a realizar investigaciones en el área confirmando la presencia de oro, fecha desde la cual la empresa decidió llevar a cabo una exploración local de mayor profundidad analítica incluyendo: Cartografía, trincheras y sondeos diamantinos, definiendo así los rasgos geológicos en profundidad como son litología, alteraciones hidrotermales, estructura y mineralización, estudios que simultáneamente fueron reforzados con estudios petromineragráficos.

Es así que el yacimiento de Pucamarca situado en la Región Tacna-Moquegua al noreste de la ciudad de Tacna, específicamente se ubica en la Falla Incapuquio, una importante estructura regional que se extiende más de 100 kilómetros en dirección NW-SE y en cuyo entorno se encuentran muchos yacimientos minerales principalmente cupríferos.

En este yacimiento se observa la presencia de dos apófisis intrusivos; uno de composición pórfido andesítico y el otro pórfido de cuarzo, que podrían haber aportado las soluciones mineralizantes auroargentíferas, a través de una diatrema..

Las alteraciones en la diatrema y en la roca caja relacionadas con la mineralización, son principalmente silicificación intensa en la parte central gradando a argílica avanzada, argílica y propílica hacia los bordes. La mineralización hidrotermal se habría depositado primero a través de una fase sulfídica inicial de más alta temperatura, en la cual se depositaron sulfuros de cobre y hierro. Ésta fase deposicional habría sido oxidada y parcialmente destruida por nuevas soluciones hidrotermales ascendentes que dieron lugar a la deposición del oro y la plata en forma diseminada, en una fase deposicional de más baja temperatura que la fase sulfídica inicial, y se caracteriza por la asociación oro libre, oropimente, rejalgarcinabrio y azufre nativo. Ésta asociación es típica del ambiente epitermal, en la cual la plata se presenta algunas veces asociada al oro (electrum), como sulfosales y raramente plata nativa. Los resultados de los estudios llevados a cabo hasta el momento llegan a la conclusión de que Pucamarca es un yacimiento epitermal de oro de alta sulfuración.

Es en esta trama que se encuentra circunscrita la presente investigación, ya que se considera que la productividad de un yacimiento se refleja entre otros en dos aspectos muy importantes:

Primero la productividad económica del mismo, para este caso extraoficialmente se han estimado recursos cercanos al millón de onzas con una ley de 1.00 gramo por tonelada, ubicados dentro de un doble cono

invertido de 460 metros de diámetro por 350 metros de altura. Los ensayos metalúrgicos realizados concluyen que más del 60 % del oro es recuperable por el método de cianuración en pilas.

Segundo y no menos importante, en el aporte que estos descubrimientos puedan realizar a la construcción de conocimiento en el área geológica.

CAPITULO 1

FUNDAMENTACIÓN DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento del Problema

La franja volcánica del sur del Perú, enmarcada dentro del arco magmático principal en los Andes Peruanos presenta un interesante potencial aurífero epitermal, cuyas manifestaciones son los actuales yacimientos de Aruntani y Huilacollo.

A partir de lo expuesto en la revisión bibliográfica surge nuestra motivación para investigar a profundidad las características del yacimiento aurífero de Pucamarca; ya que el interés radica en poder reconocer este yacimiento como un estilo epitermal de alta sulfuración alojado en una diatrema.

Si bien este tipo de yacimiento no ha sido estudiado profundamente en el sur del Perú, nuestra postura además de identificarlo con las características de un estilo epitermal de alta sulfuración, radica en poder situarlo en un contexto de estudio y comparación con otros yacimientos auríferos alojados en diatremas en el Perú y el mundo.

Lo anterior permite aportar a la construcción del conocimiento geológico sobre la variedad y potencial aurífero que existe en la franja volcánica cenozoica del sur del Perú.

Es en este contexto que nos preguntamos lo siguiente:

- Cuales son las características que presenta el yacimiento aurífero de Pucamarca?
- Las características presentes son similares a las características de un yacimiento epitermal de alta sulfuración?
- Guardan estas características similitud con las presentadas por otros yacimientos auríferos epitermales alojados en diatremas en el Perú y el mundo?.

Cuestionamientos a partir de los cuales se postula la siguiente hipótesis desarrollada a continuación.

1.2. Justificación

La importancia del presente trabajo, radica en que la obtención de una descripción detallada y organizada de las características de estos yacimientos y del yacimiento Pucamarca, sirvan para orientar la búsqueda de nuevos yacimientos y contribuir de ésta manera al amplio campo de conocimiento de la geología

1.3 Hipótesis

En base a los resultados obtenidos producto de la exploración en el cerro Checocollo y alrededores; se postula que el yacimiento aurífero Pucamarca presenta características correspondientes a un modelo epitermal de alta sulfuración, presentando similitud con otros yacimientos auríferos alojados en diatremas en el Perú y el Mundo.

A partir de este cuestionamiento se generan los siguientes objetivos de investigación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Describir y analizar las características geológicas del yacimiento aurífero de Pucamarca situandolo en un ámbito regional, local y comparativo.

1.4.2. Objetivos Específicos

- a) Describir las características del yacimiento aurífero de Pucamarca, según las características geológicas del propio yacimiento:
 - Geografía regional
 - Geomorfología
 - Estratigrafía
 - Rocas ígneas é intrusivas
 - Aspectos estructurales

- b) Describir que características pertenecientes al yacimiento aurífero corresponden a un estilo de alta sulfuración.

- c) Situar las características del yacimiento en un contexto de estudio y comparación con los siguientes yacimientos auríferos alojados en diatremas en el Perú y el mundo.
 - Quicay (Perú)
 - Marcapunta (Perú)
 - Kelian Gold Mine (Indonesia)
 - Rosia Montana (Rumanía)

1.5. Variables

1.5.1. Identificación de Variables

1.5.1.1. Variable Independiente. Área de estudio regional implicando el área del yacimiento.

1.5.1.2. Variables Dependientes. Características epitermales de yacimientos auríferos, diatremas.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. Yacimientos Auríferos Epitermales

Son depósitos minerales en los que la mineralización ocurrió dentro de 1 a 2 km de profundidad desde la superficie terrestre y se depositó a partir de fluidos hidrotermales con temperaturas que varían desde menos de 100 °C hasta 320° C. Estos depósitos se encuentran principalmente en áreas de volcanismo activo alrededor de los márgenes de continentes o arcos de islas. A estos yacimientos se asocia una mineralización principalmente de oro y plata con presencia mayor ó menor de sulfuros de metales base en general cobre, plomo y zinc. La mineralización se da principalmente en vetas, vetillas ó diseminaciones asociadas algunas veces a intensas zonas de brechamiento.

Se conocen dos estilos de mineralización: 1).Alta sulfuración y 2).Baja sulfuración. El primero se encuentra relacionado con clásicos fenómenos volcánicos tipo aparato central ó calderas; sistemas ricos en azufre (generadores de grandes cantidades de ácido sulfúrico) que dan origen a facies de alteración tipo argílica avanzada, con otras facies que incluyen intensa silicificación y propilitización. El segundo se encuentra relacionado con manifestaciones tipo campo geotérmico

y las facies de alteración presentes son principalmente de tipo potásica y clorítica. Un tercer tipo denominado de sulfuración intermedia está siendo introducido actualmente, considerando variaciones estructurales y geoquímicas entre alta y baja sulfuración.

2.1.2. Yacimientos de Alta Sulfuración en el Sur del Perú

Desde 1990 en el Perú los conceptos en la exploración del oro han experimentado cambios considerables puesto que se ha reconocido el enorme potencial aurífero de depósitos epitermales principalmente en rocas volcánicas del Terciario. Es así que en el sur peruano y norte chileno dentro de esta franja magmática ocurren yacimientos epitermales auríferos de alta sulfuración como son Aruntani, Huilacollo y recientemente Chucapaca en el lado peruano; presencia complementada con yacimientos como El Indio y Maricunga en el lado chileno. La edad de estos yacimientos se concentran en el Mioceno, coincidiendo posiblemente con una convergencia más rápida y menos oblicua de la corteza oceánica bajo la placa continental.

2.2. Antecedentes

Se han desarrollado trabajos, tesis de grado y numerosas publicaciones sobre el tema de los yacimientos epitermales en el Perú, cuyo objetivo ha sido demostrar la historia, las estrategias y técnicas de exploración empleadas, así como exponer las características geológicas y geoquímicas de los yacimientos descubiertos, Es en este contexto que Pucamarca contribuirá a aumentar los conocimientos sobre este tipo de mineralización.

Históricamente no existe evidencia de actividad minera en el área; con excepción de los yacimientos de Toquepala, Quellaveco, Cuajone y pequeñas minas en las zonas de Ilabaya y Tarata.

En el campo de la exploración minera el consorcio SIMSA-Milpo-BTX, iniciaron una exploración regional en el sur del Perú, a inicios de la década de los 80, con resultados moderadamente halagadores.

En territorio chileno, adyacente al área mineralizada de Pucamarca, empresas como M. Hoshschild, Teck Cominco y SHELL Chile se encuentran realizando trabajos exploratorios con resultados extraoficialmente negativos.

2.3. Descubrimiento del Yacimiento Aurífero Pucamarca

Destacando la importancia de los yacimientos epitermales de alta sulfuración conocidos en el sur peruano y norte de Chile, dentro de esta franja volcánica terciaria es que se descubre el yacimiento aurífero alojado en una diatrema y que será conocido como Pucamarca; presente en un área poco explorada a pesar de los indicios ya conocidos; cuyas características descritas en el presente trabajo permitirán ubicarlo y compararlo dentro de un yacimiento aurífero epitermal de alta sulfuración.

2.3.1. Ubicación Geográfica y Accesibilidad

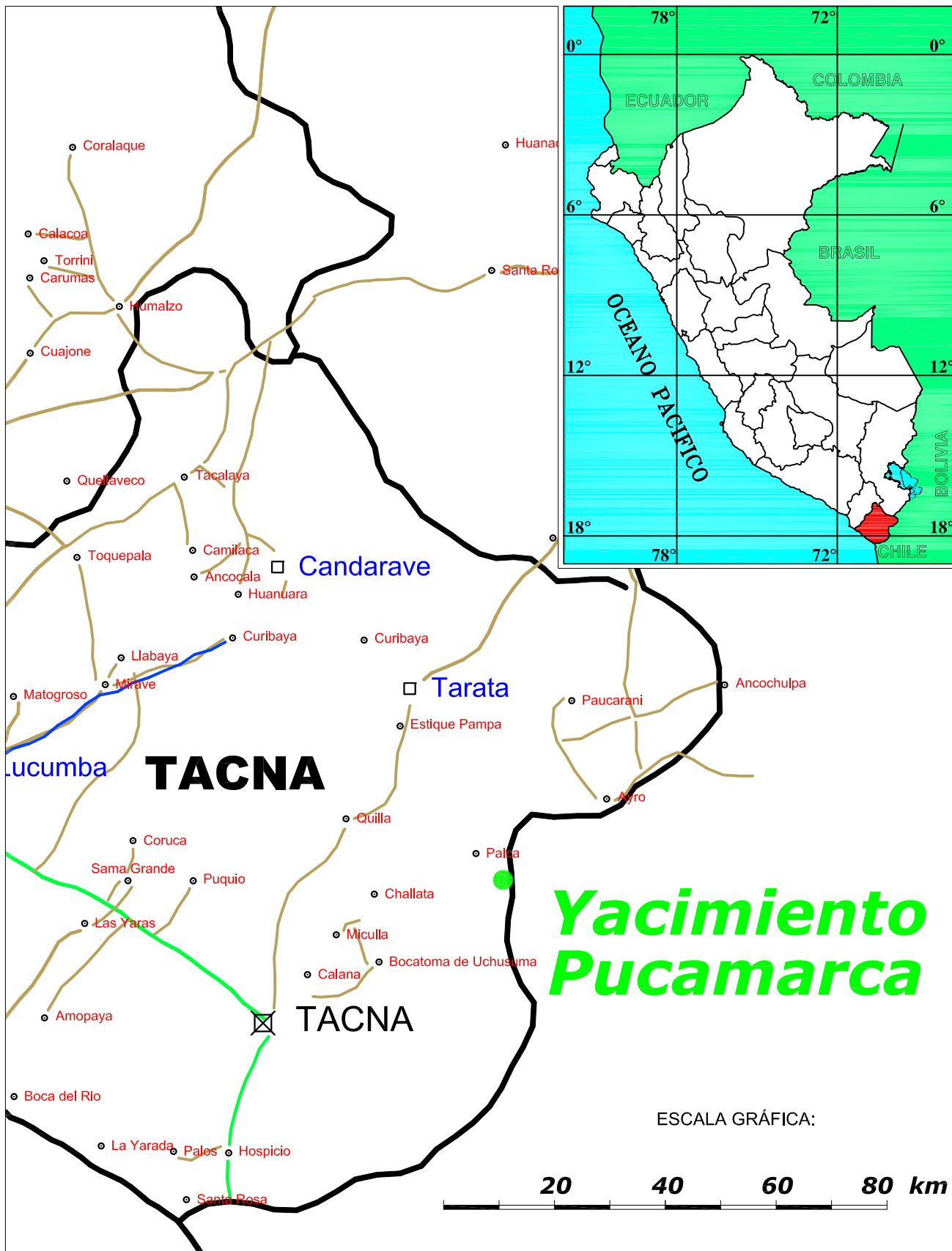
El yacimiento está ubicado a 53 kilómetros al noreste de la ciudad de Tacna. El punto centro del mismo está dado por las coordenadas UTM 414,800 E y 8029,800 N, en la carta topográfica nacional 36 X, a una altitud de 4,445 msnm (fig. 1).

El área es accesible por la siguiente ruta:

Lima –Tacna - 1370 km -1,5 horas - vía aérea.

Tacna – Palca -38 km - 1.5 horas - afirmado.

Palca – Pucamarca - 98 km - 2.5 horas.



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

UNIDAD DE POSTGRADO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

MENTIÓN EN MINAS Y RECURSOS ENERGÉTICOS

**PUCAMARCA : NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE
ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ**

PLANO DE UBICACIÓN

Autor : **Felix Cerón Cáceres**

Fecha : Marzo 2010

Escala : 1/1 000,000

**FIG
1**

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo no experimental ya que no existe creación ni manipulación de variables, observando el yacimiento epidermal de Pucamarca como un fenómeno ya existente y tal como se presenta en su contexto natural.

Se trata de una investigación de nivel descriptivo debido a que se recolecta y evalúa datos sobre diversas dimensiones del fenómeno a investigar; para este caso el yacimiento aurífero Pucamarca ubicado en el sur del Perú.

El diseño de la investigación es de tipo transeccional ya que la información fue recolectada en un tiempo único con el propósito de describir la variable estudiada y analizar su presencia, incidencia e interrelación en un momento dado (Hernández Sampieri, R.H.; Fernández Collado, C; Baptista Lucio, P..2006).

3.2. Instrumentos

Para el recojo de información se utilizó los siguientes instrumentos:

- Fuentes de información académica comprendiendo medios bibliográficos y electrónicos.

- Comunicaciones personales de geólogos del medio cuya experiencia sirvió para reforzar el conocimiento sobre estos yacimientos.
- Informes privados del Proyecto Pucamarca proporcionados por la empresa MINSUR SA que incluyen estudios geológicos regionales y locales apoyados por estudios específicos de laboratorios para el caso de petrografía y mineragrafía, además de análisis cuantitativos y cualitativos de muestras de minerales y rocas.. Es importante resaltar que en relación a esta fuente de información fue necesario ceñirse de manera estricta al reglamento y lineamientos de confidencialidad de la empresa MINSUR SA; ya que seleccionó y proporcionó la información concerniente para fines estrictos de investigación.
- El uso de equipos técnicos fue importante en la obtención de información geológica del yacimiento, destacando el uso de motoperforadoras de marca PIONJAR para muestreo en trincheras y equipos de perforación diamantina de marcas LONGYEAR, DIAMEC Y BBS, además de una perforadora de marca SCRAMM para perforación con el sistema de aire reverso.

3.3. Procedimientos

En el presente trabajo, como primer paso se pidió la autorización respectiva a la empresa MINSUR SA para solicitarle tomar el tema del descubrimiento del yacimiento epitermal de Pucamarca como sujeto de la presente investigación académica. Una vez obtenidos los permisos respectivos se procedió a realizar el recojo y acopio de la información obtenida mediante los instrumentos mencionados anteriormente; para luego proceder al ordenamiento de todos los datos y redactar el trabajo final siguiendo las normas académicas otorgadas por la Escuela de Postgrado de la UNMSM.

Finalmente cabe resaltar que todo el proceso de investigación fue desarrollado bajo principio de confidencialidad, ya que a lo largo de la investigación se respetó la privacidad de la información proporcionada por la empresa MINSUR SA, siendo la información proporcionada de uso exclusivo para fines estrictos de la presente investigación.

CAPITULO 4

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Geografía Regional

El área estudiada se extiende en la Vertiente Pacífica de la Cordillera Occidental, desde las primeras estribaciones andinas hasta el Altiplano.

4.1.1. *Relieve*

En la configuración de la región se distinguen en general en su parte occidental una forma llana conocida como Pampas Costaneras; un Flanco Disectado de los Andes con valles y quebradas; la llamada Superficie de Huaylillas fuertemente erosionada y el Altiplano ubicado en el sector más oriental, con sus pampas de depósitos fluvioglaciares y sus aparatos volcánicos dentro de los cuales resalta el Volcán Tacora.

4.1.2. *Clima*

La región estudiada presenta condiciones climáticas variadas; en la Costa es cálida y desértica, con temperaturas altas en los meses de enero a marzo y relativamente bajas durante el resto del año. La temperatura media anual en ésta zona es alrededor de los 18° C.

Las precipitaciones son escasas, menores a 100 mm. por año, como lloviznas en los meses de invierno.

En el fondo de los valles del flanco andino el clima es templado y semiárido, mientras que en altiplano es frío y seco (AMEC (Perú) SA, 2006).

4.1.3. Población

La ciudad de Tacna capital de departamento de Tacna a 562 msnm y con 269,255 habitantes, es el centro político administrativo y económico del departamento de Tacna.

En la región estudiada tenemos como centro poblado más importante el distrito de Palca con una población estimada de 1,210 habitantes.

El centro poblado más cercano al yacimiento es el de Vilavilani, anexo del distrito de Palca que cuenta con una población de 80 familias.

Todos los pueblos adyacentes a la ciudad de Tacna, son pueblos de escaso desarrollo, y sometidos a la influencia económica de la ciudad de Tacna.

4.1.4. Agricultura

La principal actividad económica de la región es la agricultura, ésta se desarrolla mayormente en el valle de Tacna, en donde se cultiva principalmente olivo, vid, orégano, durazno, maíz, ají y alfalfa.

En los valles subsidiarios las áreas agrícolas se circunscriben a angostas terrazas fluviales y los productos principales son maíz, cebada, trigo, habas, papas, alfalfa y orégano.

En las áreas altiplánicas los cultivos son escasos.

4.1.5. Ganadería

La zona ganadera se encuentra en el altiplano, donde se crían alpacas, llamas y vicuñas. La ganadería en los valles es escasa y solo se cría ganado vacuno y caprino.

4.1.6. Comercio e Industria

El comercio exterior de Tacna se centra principalmente como exportador de cobre, molibdeno, plata, alambrón de cobre, cemento blanco, pescado, mariscos, elaboración de productos lácteos y otros.

4.1.7. Vías de Comunicación

Durante muchos años la carretera Panamericana Sur, fue la única carretera asfaltada con la que contaba Tacna. Actualmente se añade la Carretera Costanera y otras a distritos aledaños. El crecimiento de la ciudad así como de los pueblos y sus poblaciones incrementa la necesidad de mayor vínculo con otras áreas regionales para fortalecer la dinámica comercial, económica, social etc. y alcanzar mayor integración con países limítrofes como Bolivia, Brasil y Chile; vías importantes pero abandonadas por el estado peruano, refiriéndonos específicamente a la llamada carretera Tacna-Tripartito, que pasa muy cerca del Yacimiento Pucamarca.

4.1.8 Hidrografía

Los ríos Caplina, Locumba, Cinto, Salado, y Sama constituyen los principales cursos de agua de la región; además las lagunas Suches, Aricota, Vilacota y Blanca.

El área del yacimiento Pucamarca se ubica en la cuenca del Río Caplina. El sistema Caplina nace en los nevados del Barroso vertiente del lado sur, su recorrido es de NE a SW. Se considera dentro este sistema el Canal de Uchusuma, que recoge las aguas del río del mismo nombre y a través del mismo, que nace en territorio peruano, surca parte del territorio chileno y vuelve a ingresar a territorio peruano, vierte sus aguas en la quebrada Vilavilani y junto con otras quebradas forma el Río Vilavilani. Este río recepciona las aguas del Canal de Uchusuma y en conjunto son derivadas para el consumo y riego del valle de Tacna.

El proyecto Pucamarca considera usar para su operación industrial las aguas subterráneas de la cuenca del río azufre consideradas de categoría III (drenaje hacia territorio chileno); las mismas que en el futuro quedarían a disponibilidad de las comunidades, esto es incluyendo la infraestructura de extracción de las mismas (AMEC-Perú. 2006).

4.1.9 Suelos

Los suelos característicos para el área del proyecto son típicos de la región paramosólica evidenciada por la presencia de especies vegetales identificadas como xerofíticas; donde predomina la especie ichu, el suelo no tiene aptitud agrícola.

El suelo superficial presenta una profundidad de 5 cm. a 9 cm. promedio y una base de substrato rocoso (material consolidado).

4.2. Geomorfología

El área estudiada se encuentra en la Vertiente Pacífica y comprende sectores de la Costa y la Sierra del departamento de Tacna. De este a oeste se distinguen cuatro unidades geomorfológicas:

- a) Pampas Costaneras.
- b) Flanco de los Andes disectado.
- c) Superficie de Huaylillas.
- d) El Altiplano.

4.2.1. Pampas Costaneras

Esta unidad geomorfológica se desarrolla a manera de una faja paralela a la Costa desde el nivel del mar hasta una altitud aproximada variable entre 400 y 1,000 metros. Tiene una superficie más ó menos llana, en la que destacan algunos cerros y colinas redondeadas, además de pequeñas quebradas, que drenan el terreno durante la temporada de lluvias.

Las pampas costaneras están constituidas por terrazas aluviales, dunas y mantos de arena.

4.2.2. Flanco Disectado de los Andes

Esta unidad se extiende entre las Pampas Costaneras y la Superficie de Huaylillas, con altitudes que varían entre 1,000 y 4,000 msnm. Está esculpida sobre rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivas y se caracteriza por estar disectada por numerosos valles con sección transversal en forma de “V”, pisos estrechos y fuerte gradiente del fondo de los valles; solo en sus tramos inferiores correspondientes a las Pampas Costaneras adquieren amplitud y sus cauces tienen pendientes moderadas.

4.2.3. Superficie de Huaylillas

Gran parte del área estudiada cubierta por los Volcánicos Huaylillas ha sido nombrada Superficie de Huaylillas. Esta superficie está formada por tufos blandos y compactos; desarrolla un drenaje paralelo con abundantes quebraditas muy características; su superficie tiene una pendiente uniforme; sus quebradas se tornan accidentadas. Su altura máxima es de aproximadamente 4,000 metros en contacto con el Altiplano.

4.2.4. El Altiplano

Esta unidad se desarrolla en las porciones orientales, aproximadamente desde los 4,000 metros, con una altura promedio entre 4,200 y 4,300 msnm.; con muchos conos volcánicos que superan los 5,000 metros de altitud formando la llamada Cordillera Barroso.

4.3. Estratigrafía

4.3.1. Generalidades

La columna estratigráfica en las áreas mapeadas y reconocidas comprende una secuencia de rocas sedimentarias y volcánicas que van desde el Precambriano hasta el Cuaternario Reciente (figs. 2,5 y 6).

ERA	SIST.	SERIE	UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS	SEDIMENTARIAS Y VOLCÁNICAS	INTRUSIVOS	DESCRIPCIÓN
CENOZOICO	CUATERNARIO	HALOCENO	Dep. de ceniza	V V V V V V V V V V		Cenizas y tufos volcánicos
		PLEISTOCENO	Dep. fluviales	o o o o o o o o o o		
			Dep. aluviales	Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ Δ		Gravas, conglomerados y arenas
			Dep. fluvio-glaciales	o o o o o o o o o o		
	TERCIARIO	PLIOCENO	Fm. Maure			Conglomerados y tufos riolíticos
			Fm. Barroso			Lavas y tufos traquíticos
			Fm. Huaytillas			Tufos dacíticos y riolíticos
			Gpo. Chachani			
		MIOCENO	Fm. Moquegua			Conglomerados y areniscas
		OLIGOCENO	Fm. Huilacollo			Diatrema Pucamarca
						Pórfido de Cuarzo Pucamarca y Riollas
MESOZOICO	CRETÁCEO	EOCENO				Pórfido Andesítico Pucamarca
						Derrames y Piroclásticos Andesíticos
		PALEOCENO	Fm. Tarata			Monzonita
						Diorita
						Granodiorita
						Conglomerados areniscas, tufos y brechas andesíticas
	JURÁSICO	SUPERIOR	Fm. Toquepala			Derrames y piroclásticos andesíticos
			Fm. Chuluncane			Areniscas y conglomerados
			Fm. Chachacumane			Cuarcitas
		MEDIO	Fm. Ataspaca			Pizarras y areniscas
			Fm. San Francisco			Areniscas, calizas y lutitas
			Fm. Pelado			Calizas y lutitas
PRECAMBRIANO	TRIÁSICO		V. Junereta			Derrames andesíticos
			Fm. Machari			Lutitas conglomerados y areniscas
			Complejo basal de la costa			Gneis, esquistos, filitas, cuarcitas y volcanicos

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

UNIDAD DE POSTGRADO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

MENTIÓN EN MINAS Y RECURSOS ENERGÉTICOS

PUCAMARCA : NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE

ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ

Columna Geológica Generalizada del Área

Autor : **Felix Cerón Cáceres**

Fecha : Marzo 2010

**FIG
2**

4.3.2. Precambriano

4.3.2.1. Complejo Basal de la Costa. El gneis es un ortogneis granodiorítico de grano medio a grueso, de color gris claro, con distribución de diferentes minerales en forma paralela compuesto de hornblenda, mica feldespato y cuarzo. Frecuentemente se encuentran pequeños diques de pegmatita compuesto de ortosa, moscovita, cuarzo y anfíboles de alta temperatura.

4.3.3. Triásico

4.3.3.1. Formación Machani. Secuencia de areniscas, conglomerados y lutitas negras (1,046m de espesor) que sobreyacen al gneis del Precambriano con discordancia angular y subyacen a los volcánicos de la Formación Junerata.

4.3.4. Jurásico Inferior- Medio

4.3.4.1. Formación Junerata. Está compuesta mayormente por bancos gruesos de andesita porfirítica gris verdosa y rojiza (1,000 m de espesor), con variaciones regionales a volcánicos ácidos de color claro; infrayace a la Formación Pelado con discordancia paralela.

4.3.4.2. Formación Pelado. Alternancia de calizas, lutitas calcáreas, limolitas calcáreas, calizas arenosas y conglomerados de guijarros volcánicos (510 m. de espesor).

Suele presentarse con discordancia paralela debajo de las rocas del Grupo Yura del Cretáceo inferior.

4.3.5. Jurásico Medio

4.3.5.1. Formación San Francisco. Unidad litológica consistente en areniscas, lutitas y calizas (624 m de espesor), correlacionable con la Formación Socosani de Arequipa.

4.3.6. Jurásico Superior

4.3.6.1. Grupo Yura-Formación Ataspaca. Secuencia de areniscas y cuarcitas intercaladas con lutitas oscuras y calizas erráticas (1,093 m de espesor); el contacto con la Formación Chachacumane sobreyacente no es muy claro dada su variación gradacional.

4.3.7. Cretáceo Inferior

4.3.7.1. Grupo Yura-Formación Chachacumane. Consiste de cuarcitas blancas en bancos gruesos intercalados con lutitas oscuras (513 m. de espesor). Las cuarcitas muestran estratificación cruzada.

4.3.7.2. Grupo Toquepala- Formación Chulluncane. Conformada por conglomerados y areniscas tufáceas (719 m. de espesor). Esta formación sobreyace a las cuarcitas blancas de la Formación Chachacumane e infrayace a los volcánicos de la Formación

Huilacollo teniendo en cuenta que sus relaciones estratigráficas son discordancias angulares.

4.3.8. Cretáceo Superior

4.3.8.1. Grupo Toquepala-Formación Toquepala. Presenta una litología variable; consiste de volcánicos intercalados con lentes de sedimentos (1,575 m. de espesor). Los volcánicos varían en composición entre riolitas y andesitas; los sedimentos intercalados son conglomerados y areniscas feldespáticas (arkosas).

4.3.9. Terciario Paleoceno-Eoceno

4.3.9.1. Grupo Toquepala-Formación Tarata. Alternancia de conglomerados, areniscas tufáceas, brechas volcánicas, lutitas verdosas y derrames andesíticos (1,398 m. de espesor). Superyace a la Formación Toquepala con discordancia angular.

4.3.10. Terciario Eoceno-Oligoceno

4.3.10.1. Formación Huilacollo. Esta formación yace en discordancia paralela debajo de la Formación Huaylillas e infrayace localmente a la Formación Barroso con discordancia angular; es una unidad muy importante para el Yacimiento Pucamarca, pues constituye la roca caja de la Diatrema Pucamarca. Consiste de derrames y piroclásticos volcánicos, con un predominio de brechas, aglomerados y tufos de grano grueso (1,000 m. de espesor). La mayor parte de la roca es de composición andesítica con algunas

dacitas. Su ambiente de deposición es muy posiblemente continental.

4.3.11. Terciario-Mioceno

4.3.11.1. Grupo Chachani-Formación Moquegua. Compuesta en gran parte por conglomerados y cantidades menores de areniscas (400 m. de espesor). Los conglomerados son de fragmentos subredondeados de rocas volcánicas con poco contenido de material sedimentario.

4.3.12. Terciario-Plioceno

4.3.12.1. Grupo Chachani-Formación Huaylillas. Unidad importante en el Yacimiento Pucamarca, pues tendría relación con el intrusivo pórfido de cuarzo.

Litológicamente consiste de tufos ácidos de composición dacítica y riolítica (600 m. de espesor), con cierta diferencia de color, textura y mineralogía.

4.3.12.2. Grupo Chachani-Formación Barroso. Unidad importante en el sur del Perú; podría estar cubriendo eventos hidrotermales. Está conformada por bancos de tufos y lavas de composición traquítica, con cantidades menores de andesita (1,500 m. de espesor). Los tufos predominan sobre las lavas.

4.3.12.3. Grupo Chachani-Formación Maure. Consiste de conglomerados sueltos, sobre los cuales yace un horizonte de tufos blandos y porosos parecidos al sillar (25 m. de espesor).

4.3.13. Cuaternario-Pleistoceno

4.3.13.1. Depósitos Fluvioglaciares. Depósitos que incluyen morrenas laterales y terminales, gravas y areniscas depositadas por las aguas provenientes de los glaciares. El material que los constituye está formado por cantos subangulares de roca volcánica en una matriz gredosa.

4.3.13.2. Depósitos Aluviales. Integra terrazas fluviales, piedemontes y depósitos de derrumbes. Las terrazas fluviales consisten de conglomerados con una matriz de arena y lodo, con una variedad litológica. Los depósitos de piedemonte consisten en conglomerados, grava y arena también de litología variada. Para los depósitos de derrumbes se asumen principalmente los depósitos acumulados en el entorno de la llamada Superficie de Huaylillas, dada la fuerte erosión fluvial sobre un terreno poco consolidado.

4.3.14. Cuaternario-Holoceno

4.3.14.1. Depósitos Fluviales. Depósitos de gravas y arenas en pleno proceso de transporte y deposición temporal en el fondo de los ríos.

4.3.14.2. Depósitos de Ceniza. Litológicamente consiste de ceniza volcánica de color blanco o rosado con fragmentos de pómez blanca; su correlación desconocemos.

4.4. Petrología y Rocas Ígneas

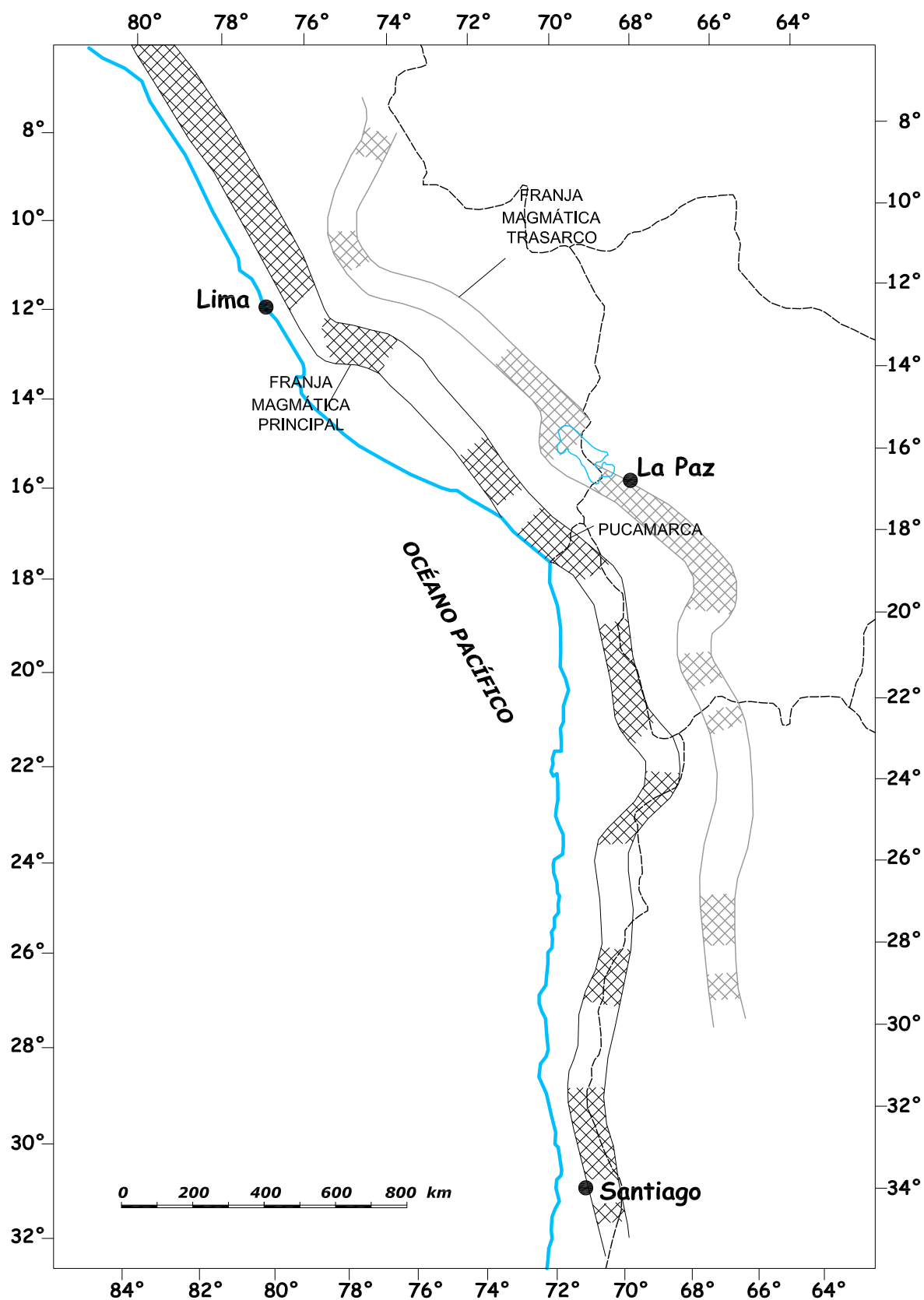
4.4.1. Generalidades

Las rocas intrusivas reconocidas en el área son debidas a la actividad magmática producida entre el Cretácico medio y Terciario inferior (50 a 115 Ma), a lo largo del área comprendida entre 6.5° S hasta 33.5° S (Petersen, U. 1,999). Éste arco magmático estuvo cerca de la Costa con tendencia a migrar hacia el Este (Cabello, José.1992); esto debido a una posible disminución del buzamiento de la Placa de Nazca bajo la Placa Continental (Figs. 3 y 4).

Las rocas intrusivas reconocidas forman parte del gran Batolito Andino; se encuentran emplazadas también en formaciones sedimentarias y volcánicas mesozoicas y terciarias. Los intrusivos más importantes son las granodioritas, monzonitas, dioritas, andesitas, riolitas y pórfidos de cuarzo (figs. 5 y 6).

4.4.2. Granodiorita

La roca intrusiva más abundante es la granodiorita en el área de estudio; reconocida principalmente en el Flanco Disectado y debajo de la Superficie de Huaylillas. La composición es poco variable pero siempre conteniendo plagioclasa intermedia (oligoclasa-andesina), hornblenda, biotita y cuarzo. Frecuentemente presenta diques aplíticos y diques verdosos de composición andesítica, además de xenolitos. La alteración manifiesta en sus cajas es de silicificación,



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

UNIDAD DE POSTGRADO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

MENCION EN MINAS Y RECURSOS ENERGÉTICOS

PUCAMARCA : NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ

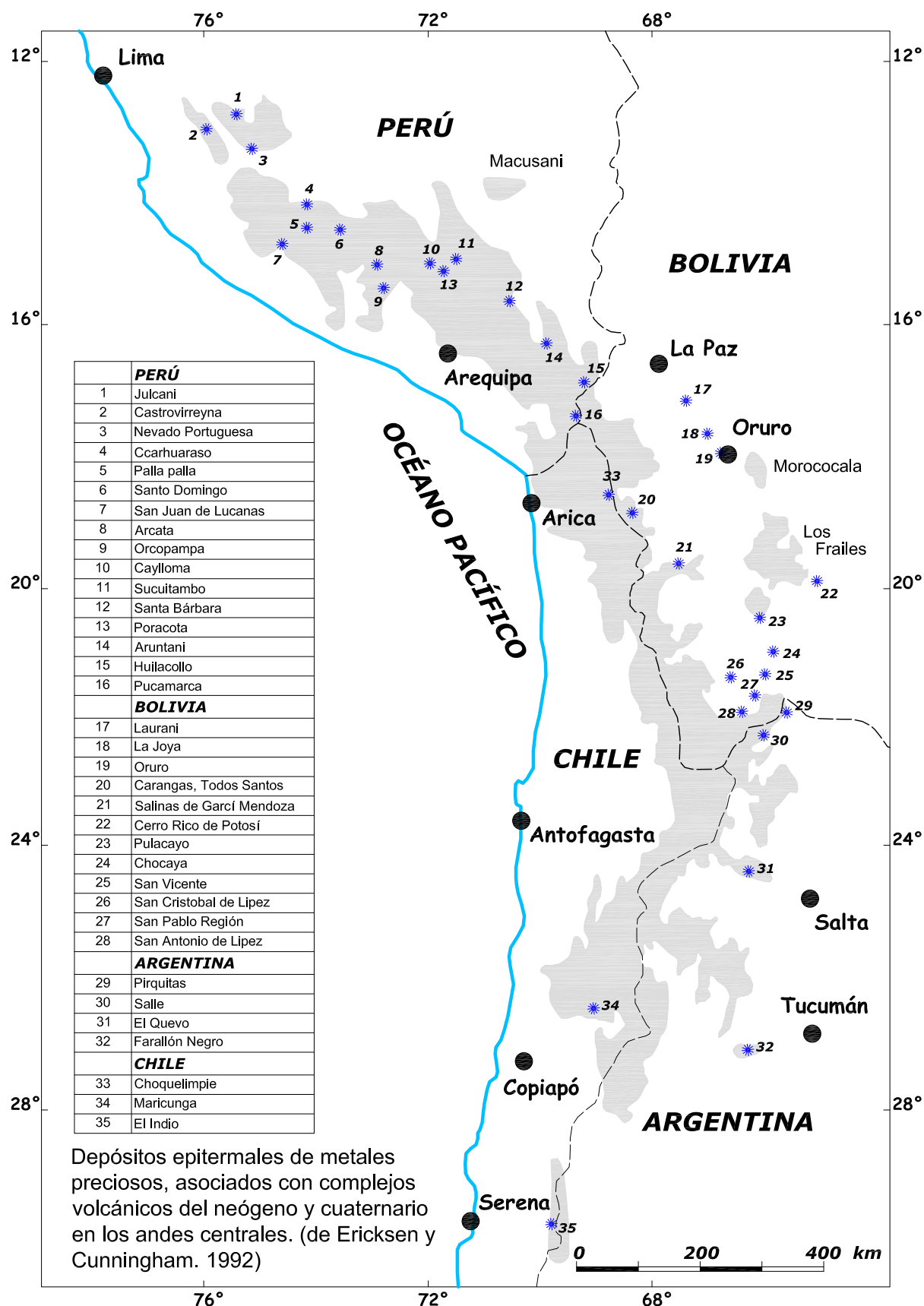
Magmatismo y Yacimientos Hidrotermales en los Andes del Sur del Perú - 5 a 25 ma.

Autor : **Felix Cerón Cáceres**

Fecha : Marzo 2010

Escala : Gráfica

**FIG
3**



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

UNIDAD DE POSTGRADO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

MENCION EN MINAS Y RECURSOS ENERGÉTICOS

PUCAMARCA : NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ

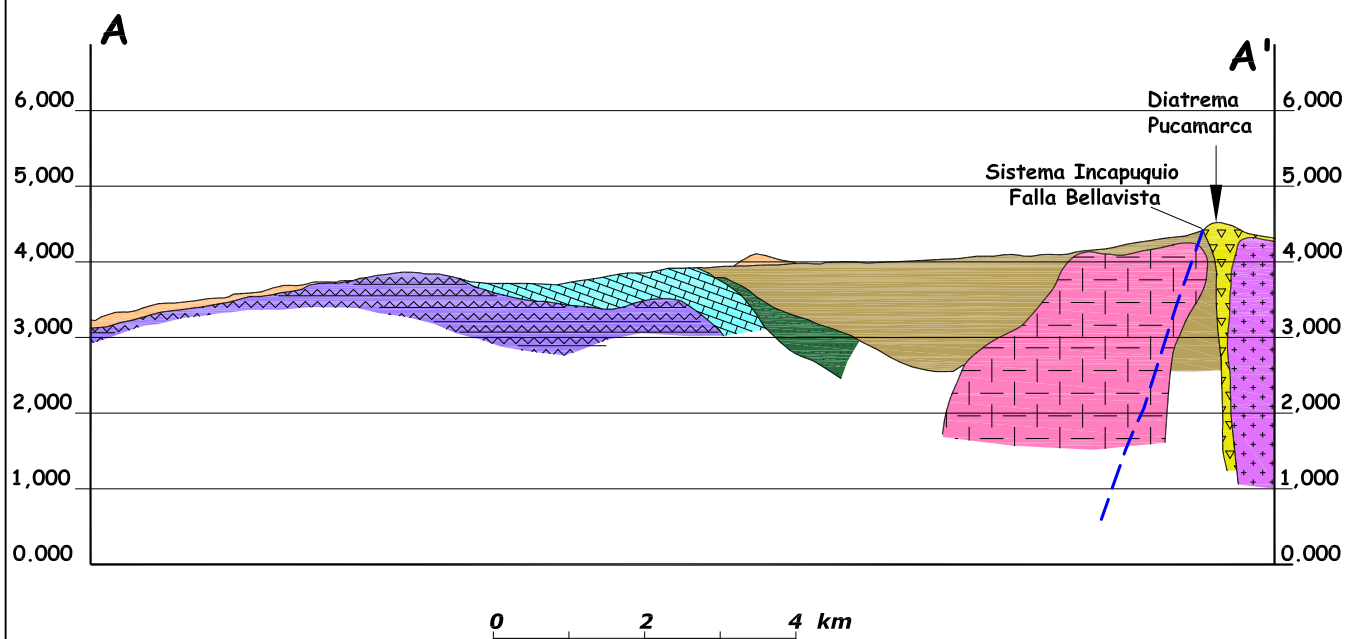
Depósitos Epitermales en los Andes del Sur del Perú

Autor : **Felix Cerón Cáceres**

Fecha : Marzo 2010

Escala : Gráfica

**FIG
4**



LEYENDA				
SISTEMA	FORMACIÓN	INTRUSIVOS	ALTERACIÓN HIDROTÉRMICA	SIMBOLOGÍA
CUATERNARIO	Depósitos fluvio-glaciares		Silificación	Contacto litológico
TERCIARIO	Fm Maure		Argilización	Dique
	Fm Barroso			Rumbo y buzamiento de capas
	Fm Huayillas			Fracturamiento moderado
	Fm Moquegua	Brecha		Fracturamiento intenso
	Fm Huilacollo	Pórfido de cuarzo		Carretera
CRETÁCEO	Fm Chulluncane	Pórfido andesítico		Río
	Fm Chachacumane	Diorita		Límite Internacional
	Fm Ataspaca	Granodiorita		Falla observada
JURÁSICO	Fm Pelado			Falla inferida
	Fm Junerata			Estructura mineralizada (veta)
				Túnel
				Eje anticlinal
				Eje sinclinal

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

UNIDAD DE POSTGRADO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

MENTIÓN EN MINAS Y RECURSOS ENERGÉTICOS

PUCAMARCA : NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ

Sección Geológica A-A'

Autor : **Felix Cerón Cáceres**

Fecha : Marzo 2010

Escala : 1:100,000

**FIG
6**

epidotización y granatización, con presencia errática de mineralización en vetas y diseminaciones. Su edad fluctúa entre el Cretáceo superior y el Paleógeno inferior.

4.4.3. Monzonita

Presente en pequeños stocks; su composición mineralógica tiene principalmente plagioclasa, ortosa, hornblenda, biotita y cuarzo. No presenta mayor alteración pero si suele ocurrir presencia de algunas vetas de minerales de cobre. Su edad fluctúa entre el Cretáceo superior y el Paleógeno.

4.4.4. Diorita

Se presenta en pequeñas apófisis como una roca grisácea algo verdosa, constituida por plagioclasa intermedia (oligoclasa-andesina) y hornblenda. Tiene mineralización de cobre asociada, que fue objeto de trabajos prospectivos. Su edad fluctúa entre el Cretáceo y el Paleógeno.

4.4.5. Pórfido Andesítico

Reconocido principalmente en la Formación Huilacollo como cuerpos subvolcánicos cerca de la Diatrema Pucamarca. Presenta color gris oscuro, textura porfirítica de grano grueso; sus minerales esenciales son plagioclasa tipo andesina, biotita y hornblenda. No presenta alteración en sus cajas pero cerca de la Diatrema Pucamarca se presenta alunitizada o silicificada. Su edad estaría ubicada en el Paleógeno.

4.4.6. Riolita

Ocurre como diques ó apófisis cerca de las fallas regionales; es de color blanco a verdoso, de aspecto compacto, con escasos cristales de cuarzo y feldespatos, no se observan minerales máficos. Su edad relativa se ubica entre el Cretáceo superior y Paleógeno.

4.4.7. Pórfido de Cuarzo

Intrusivo posiblemente relacionado con los Volcánicos Huaylillas (Gardeweg, Mayra.1992), se le ha reconocido en la Diatrema Pucamarca y en los alrededores. Es de color gris, grano grueso de aspecto compacto con fenocristales de cuarzo de hasta un centímetro de diámetro en una matriz afanítica grisácea. Su edad también se considera entre el Cretáceo superior y Terciario inferior. Ésta roca es muy importante, pues está relacionada también con chimeneas en el yacimiento de Toquepala.

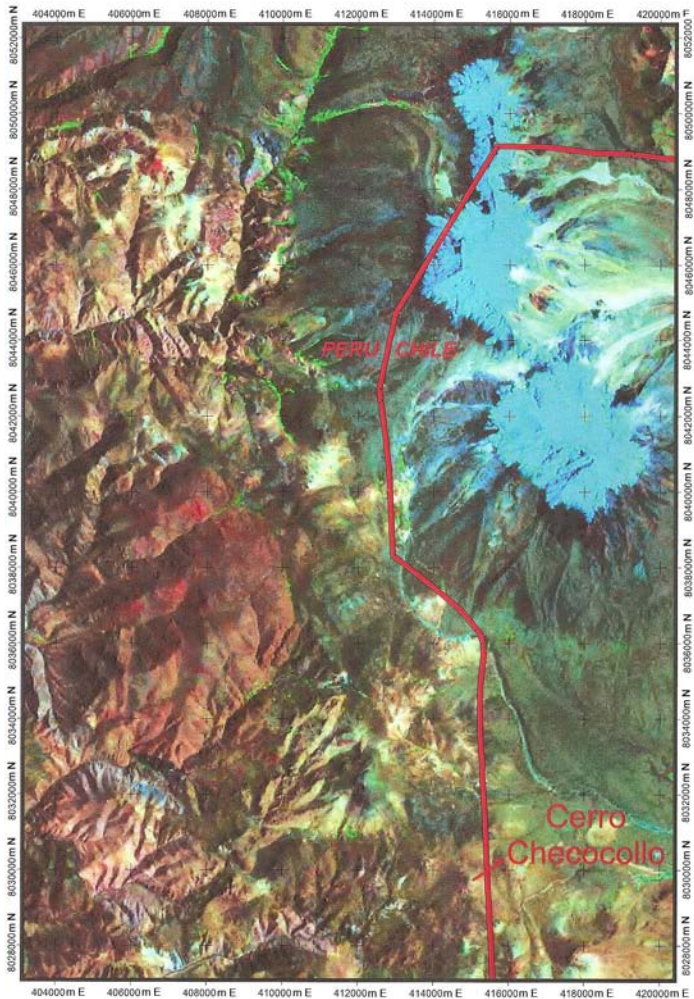
4.5. Aspectos Estructurales

4.5.1. Generalidades

En el área estudiada los rasgos estructurales guardan estrecha relación con la naturaleza de las rocas expuestas. Las rocas volcánico-sedimentarias se hallan fuertemente plegadas y falladas; en cambio las rocas volcánicas muestran un tectonismo más moderado. Las rocas intrusivas no se muestran muy disturbadas.

La estructura dominante en el área de estudio es el Sistema de Fallas Incapuquio, además de un sistema al que llamaremos norte-sur,

relacionado al tectonismo del norte del vecino país de Chile (figs. 5, 6 y 7).



FECHA : 14-12-04
 ESCALA : 1/100,000

Bandas 3-2-1

PROYECTO PUCAMARCA
 IMAGEN SATELITAL
 PALCA 36-X

FIG
7

4.5.2. Sistema de Fallas Incapuquio

Este sistema de fallas estudiado en el sur del Perú, dada su relación con importantes yacimientos cupríferos, presenta tres elementos principales que son las fallas Incapuquio, Challaviento y Bellavista.

4.5.2.1. Falla Incapuquio. Esta falla hace su ingreso en el área de estudio por el cerro Herbabuena, al noroeste del poblado de Caplina, con rumbo sureste, perdiéndose en el intrusivo granodiorítico frente al caserío de Ataspaca. Cerca del Cerro Herbabuena esta falla está relacionada a un dique riolítico de algunos centenares de metros de ancho.

Es posible que esta falla esté relacionada a la mineralización del prospecto de Ataspaca, que presenta características tipo pórfido de cobre, el mismo que fue explorado; es posible que estos trabajos estén incompletos.

4.5.2.2. Falla Challaviento. La falla nace de la Falla Incapuquio, ingresa al área de estudio cerca del caserío de Charicahua, con rumbo sureste paralela a la Falla Incapuquio; al ingresar a territorio chileno tiende a colocarse en posición Este-Oeste.

En el tramo cercano al poblado de Charicahua, la falla separa al intrusivo granodiorítico de la caliza y mármol de la Formación Pelado, para luego más al sureste entrar nuevamente al intrusivo.

En la traza de la falla al sureste del poblado de Charicahua se han reconocido afloramientos de aguas termales con segregación de rejalgas, además de fuerte lixiviación ácida en las rocas encajonantes.

4.5.2.3. Falla Bellavista. La falla sale de la Falla Incapuquio, ingresa en el área de estudio a 2.5 km al norte del poblado de Palca, con rumbo sureste.

Su efecto se da sobre las formaciones Junerata, Pelado y Ataspaca, dirigiéndose luego en dirección a la Diatrema Pucamarca, con tendencia a posicionarse con rumbo Este-Oeste, continuando en territorio chileno.

4.5.3. Sistema de Fallas Norte –Sur

Este sistema aún en estudio obedece a un sistema de fallas regionales provenientes desde Chile precisamente con rumbo Norte-Sur, al ingresar al Perú después de atravesar la deflexión de Arica, continúa hacia el norte posiblemente como lineamientos más que como fallas. Se especula que este sistema al intersectarse con los sistemas andinos conocidos en el Perú, parecen favorecer la formación de centros mineralizantes; observaciones que quedan como motivo de futuros estudios estructurales en el sur del Perú. Un claro ejemplo de esto podría ser el esquema estructural del Yacimiento Pucamarca.

4.6. Geología del yacimiento

4.6.1. Generalidades

El yacimiento de Pucamarca estaría genéticamente relacionado con la formación de una diatrema localizada en el Cerro Checocollo (fig.8 y 9),



Fig. 8 - Vista del cerro Checocollo, lugar del emplazamiento de mineralización aurífera en el proyecto Pucamarca

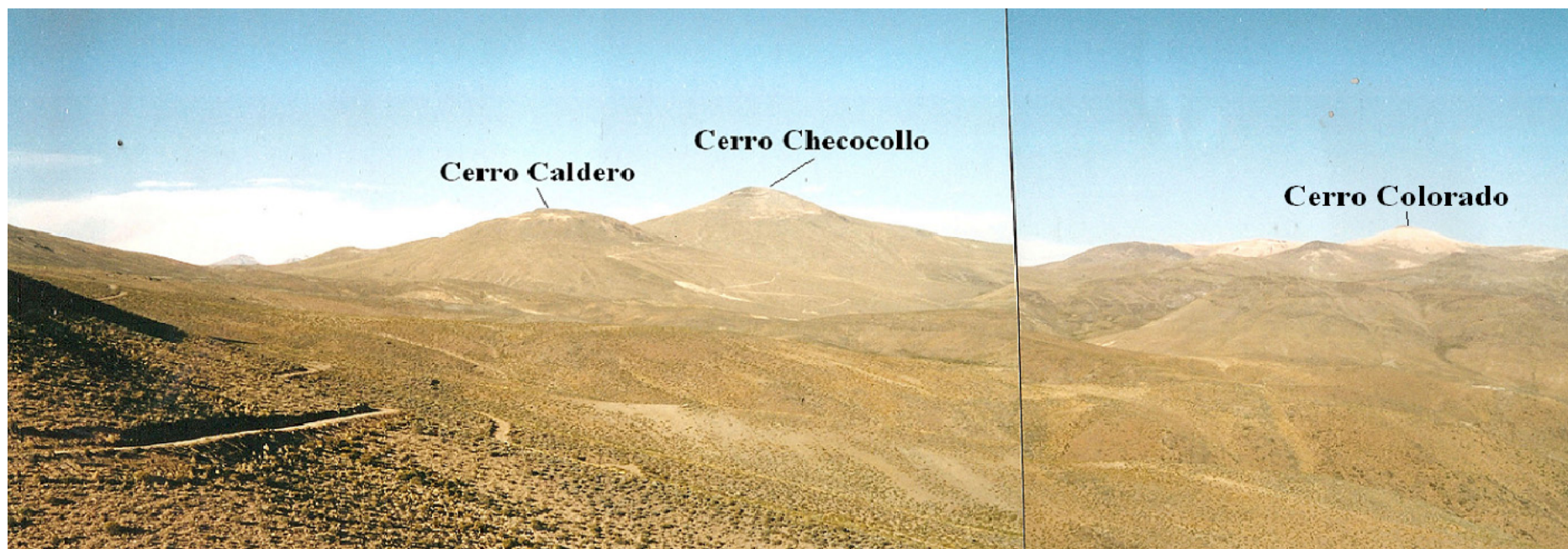


Fig. 9 – Vista panorámica del proyecto Pucamarca, en primer plano Cerro Checocollo, Cerro Caldero y al fondo a la derecha Cerro Colorado (SHELL CHILE) en territorio chileno.

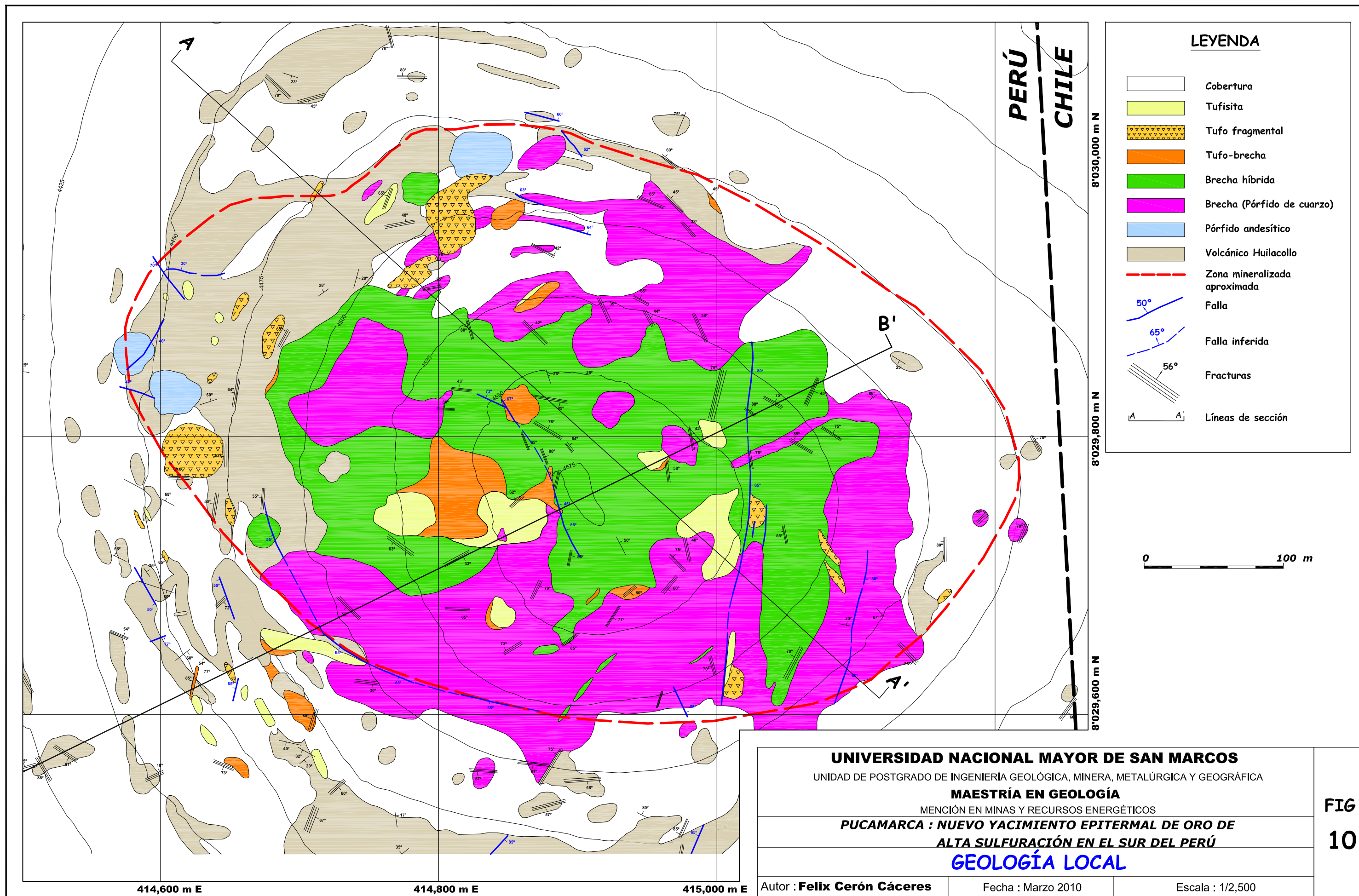
como parte del vulcanismo cordillerano producido en el sur del Perú durante el Mioceno-Plioceno. La estructura mide aproximadamente 458 m. x 477 m., con tendencia a estrecharse a profundidad, elevándose sobre la superficie promedio actual 100 metros, hasta una altura de 4,575 msnm; desarrollada sobre las rocas de los Volcánicos Huilacollo.

La Diatrema Pucamarca está asociada a un intrusivo pórfido andesítico temprano y a otro intrusivo pórfido de cuarzo más tardío, que podría haber sido el portador de las soluciones mineralizantes (6 a 8 Ma.-datación en alunita de alteración hipógena hidrotermal). (figs. 10, 11 y 12).

El cerro Caldero que alberga otro cuerpo mineralizado, pero de menor tamaño, se ubica a 1.2 km. Al noroeste del cerro Checocollo, siempre sobre la traza de la Falla Bellavista (Sistema Incapuquio), con un molde estructural parecido al del Cerro Checocollo pero menos complejo en su desarrollo (fig. 5 y 9).

4.6.2. Litología

4.6.2.1. Volcánicos Huilacollo. Esta secuencia de derrames y piroclásticos de composición andesítica-dacítica sobre la cual, por conjugación lito-estructural se ha formado la Diatrema Pucamarca y otras estructuras, presenta una débil inclinación en forma concéntrica hacia el cerro Checocollo, quizás como consecuencia de un proceso de descarga magmática. Cerca de la diatrema estas rocas son afectadas por diferentes grados de alteración hidrotermal y mineralización de oro, controladas estructuralmente por fallas y fracturas que se entrecruzan en el Cerro Checocollo.



4.6.2.2. Pórfido andesítico. Expuesto en la ladera oeste del Cerro Checocollo, presenta una textura típica de pórfido, de grano grueso, matriz gris oscura verdosa y ocasionalmente púrpura debido al contenido de hematita-limonita. En planta la geometría espacial de éste cuerpo tiene forma tabular alargada en dirección noreste y buzamiento al noroeste. Su proyección hacia el suroeste estaría sugiriendo que la masa central, desde la que se derivó, está en las proximidades de las confluencias de las quebradas Uchusuma-Checocollo.

En el Cerro Caldero, el pórfido ocurre como un stock irregular de forma dómica.

Las relaciones de campo y las evidencias recolectadas por la perforación diamantina, tanto en el Cerro Checocollo como en el Cerro Caldero, no permiten determinar la relación temporal del intrusivo de pórfido de cuarzo y del andesítico. No hay contacto entre ambas rocas o diques de una litología cortando a la otra. Sin embargo teniendo en cuenta que la secuencia deposicional de las diferentes unidades volcánicas en el sur del Perú se inician con un magmatismo de composición intermedia, que al evolucionar en el tiempo terminó en fase riolítica-dacítica; es muy posible que en el Checocollo-Caldero se haga evidente esta “diferenciación de la cámara magmática” (Rytuba, James. 1994, Goff and Gardner. 1991).

4.6.2.3. Pórfido de Cuarzo-Pórfido Brecha-Brecha Híbrida. Esta intrusión la principal en la Diatrema Pucamarca, tiene la forma de una nariz orientada hacia el noroeste, teniendo una mejor extensión superficial en la ladera sur-sureste y este del Cerro Checocollo. Suponemos que en su ascenso produjo una columna de brecha tanto de material de roca huésped (v. Huilacollo) como del pórfido. En efecto definir el contacto volcánico /pórfido de cuarzo es casi

imposible y en la mayoría de casos, esto se hace en base del porcentaje de clastos y matriz predominante, ya sea del volcánico ó el pórfido. La brecha de contacto es por lo tanto difícil de definir. En algunos casos puede alcanzar de cuatro a cinco metros ó de 40 ó 50 metros.

En profundidad el aspecto brechoso del pórfido es evidente y es muy frecuente encontrar una gradación a un pórfido de gris a gris oscuro, ligeramente verdoso que exhibe los mismos efectos de esfuerzo del intrusivo. Los fragmentos del pórfido son de naturaleza angular cerca de superficie y ocasionalmente alcanzan de 10 a 15 cm. de diámetro gradando a profundidad a formas de subangulares a subredondeadas (figs. 13,14 y 15).

El contacto del pórfido brecha gris claro con el pórfido brecha gris oscuro, es transicional y no se ha podido definir como si fueran dos etapas de intrusión. La diferencia fundamental entre estos dos pórfidos además del color es su textura:

El pórfido gris claro es polimíctico, siendo sus fragmentos de pórfido y volcánicos de la Formación Huilacollo (5 a 10 %); mientras que:

El pórfido gris oscuro es monomíctico (principalmente fragmentos de la Formación Huilacollo en una matriz porfirítica gris por contaminación) fuertemente brechado, el tamaño de los fragmentos está en el rango de 0.5 a 5.0 cm. La matriz es sílice gris de aspecto sacaroide, con intervalos ocasionales de color crema debido a la pigmentación de jarosita. Los fragmentos son subredondeados y exhiben algunas veces orientación subvertical. Ocasionalmente se ha observado un incremento sustancial de material silíceo sacaroide, englobando fragmentos subangulares del pórfido gris oscuro; en otros casos este pórfido gris adopta una textura porosa muy irregular definida como “textura gusano”. Esta se caracteriza por presentar cavidades de lixiviación de la matriz, a manera de tubos de 0.3 a 0.8 cm. de sección. Este proceso de lixiviación es total y no se ha

1. PETROGRAFIA

MUESTRA MN° - 2

CLASIFICACION

Brecha hidrotermal

COMPOSICION

Minerales Principales

Fragmentos de diferente composición, forma y tamaño:

I. Metasomatita

II. Metadacita

porfirítica

III. Cuarzita

IV. Metatonalita

Englobados por cuarzo anhedral y subhedral de diferente diámetro, turmalina en cristales no mayores a 100 micras, también anhedral de mayor desarrollo, opacos y casiterita.

Accesorios

Minerales opacos (MO): Subhedrales, anhedrales en fina diseminación en los fragmentos, en parte oxidados; en el cementante, son también anhedrales y subhedrales y en fina diseminación.

Trazas

Casiterita

TEXTURA Brechosa

ALTERACION

Marcada silicificación en los fragmentos y cementante

Minerales de alteración:

Cuarzo

Oxidos de hierro

500 micras



Fig. 13.- Estudio petrográfico de la muestra MN°-12



1. PETROGRAFIA

MUESTRA DDH - 45
(157.50 m)

Riolita porfírica

CLASIFICACION

COMPOSICION

Minerales Principales

Cuarzo (qz):
Fenocristales de gran desarrollo con bordes de reacción, microfracturados; algunos con notable extensión ondulante y contienen diminutas inclusiones fluidas, apatito, opacos y rutilo.

Sanidina : Fenocristales bien conformados subordinada a la ocurrencia del cuarzo, pro de similar tamaño.

Accesorios

Minerales opacos (MO):
Subhedrales, anhedrales y en fina disseminación.

Trazas

Escasos pseudomorfos de ferromagnesianos, reemplazados por cuarzo, leucoxeno y opacos oxidados.

Rutilo: Finos cristales y en inclusiones en el cuarzo.

Muscovita
Apatito
Leucoxeno
Zircon
Oxidos de hierro

TEXTURA

Porfírica con matriz desvitrificada

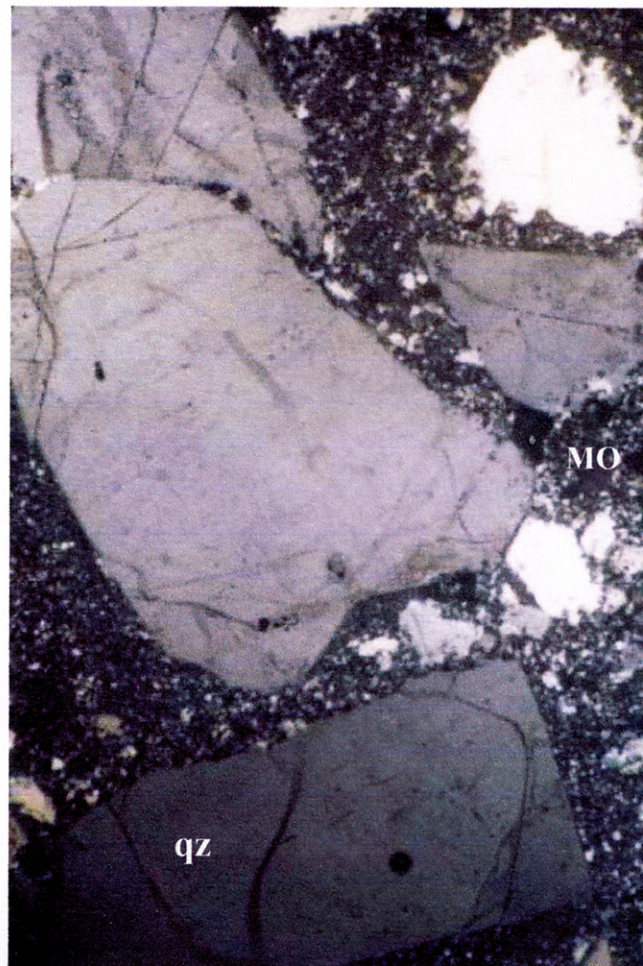
ALTERACION

Marcada silicificación y desvitrificación; ligera oxidación.

Minerales de alteración:
Cuarzo
Oxidos de hierro

500 micras

Fig. 14.- Estudios petrográficos de la muestra DDH-45 (157.50 m).



1. PETROGRAFIA

MUESTRA DDH - 29
(206-208m)

CLASIFICACION

Riolita porfírica
(Similar a DDH - 45
(157.50 m)

COMPOSICION

Minerales Principales

Cuarzo (qz):
Fenocristales de menor desarrollo que la muestra DDH - 45, con bordes de reacción, microfracturados ; algunos con notable extinción ondulante y contienen diminutas inclusiones fluídas, apatito, opacos y rutilo

TEXTURA

Porfírica con matriz desvitrificada, en parte brechosa.

ALTERACION

Marcada silicificación y desvitrificación;
ligera oxidación.

Minerales de alteración:
Cuarzo
Óxidos de hierro

Accesorios

Minerales opacos (MO):
Subhedrales, anhedrales y en fina diseminación. En la parte brechosa se observa la ocurrencia de minerales con elementos nobles: plata y oro.

Trazas

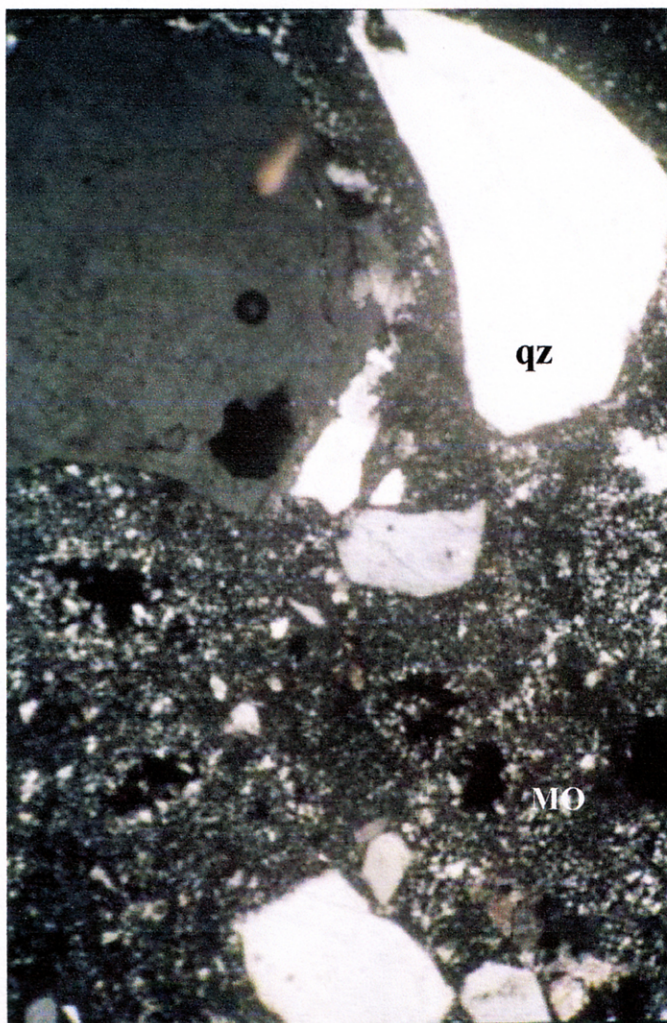
Escasos pseudomorfos de ferromagnesianos, reemplazados por cuarzo, leucoxeno y opacos oxidados.

Rutilo: Finos cristales y en inclusiones en el cuarzo.

Apatito
Leucoxeno
Zircón
Óxidos de hierro

500 micras

Fig. 15.- Estudio petrográficos de la muestra DDH-29 (206 -208 m).



encontrado minerales relictos ocupando esas cavidades, sílice sacaroide y menos frecuente alunita blanca, ocupan éstas cavidades, pero en ambos casos son minerales de deposición posterior. La textura gusano también se ha observado en los volcánicos Huilacollo, pero la presencia más frecuente es en el pórfido gris oscuro. Es muy probable que el pórfido gris oscuro sea un cambio de facie, debido a efectos de presión temperatura durante la intrusión y la alteración hidrotermal subsecuente.

Para evitar problemas de simbología y descripción, el pórfido de cuarzo ha sido nombrado pórfido brecha y de ésta manera se define su composición y textura. La relación fragmento/matriz es variable, en algunos intervalos la matriz excede a los fragmentos pero en ningún caso se ha podido definir material de composición diferente al pórfido de cuarzo.

El Pórfido Brecha generalmente es monomíctico, pero gradualmente pasa hacia arriba a una brecha polimíctica (dominio de los fragmentos del pórfido de cuarzo-Volcánicos Huilacollo sobre la matriz); en la cual se observa fragmentos angulares de la unidad volcánica suprayacente (volcánicos Huilacollo), así como fragmentos subangulares de pórfido de cuarzo. Esta unidad litológica se le denomina brecha híbrida y debe su nombre a la mezcla heterogénea fuertemente obliterada por varios eventos diastróficos y de alteración hidrotermal, principalmente varias etapas de silicificación. Esta brecha es polimíctica y los fragmentos son de tufo de grano fino, tufo de lapilli tufo de cristales, brecha y lavas de composición andesítica, así como de pórfido de cuarzo. La matriz que se encuentra fuertemente silicificada consiste de fragmentos de roca de composición andesítico-dacítico, envueltos en material molido (tamaño de arena a limo), de composición similar. La sílice es de grano fino ocasionalmente calcedónica, con fractura concoidal y menos frecuentemente granular. En el último caso el espacio intersticial es ocupado por un material blanco, que da la impresión de ser material arcilloso (montmorillonita-

caolin etc). Sin embargo el análisis petrográfico de éste material indica ser sílice muy fina (polvo de roca), introducido durante la fase posterior a la intrusión del pórfido de cuarzo y a las diferentes fases de silicificación hidrotermal.

El polvo de roca (milled rock) es en esencia sílice microgranular (150 a 200 mallas), que al paso de los fluidos (gases y líquidos) a lo largo de las fracturas ha lixiviado y luego depositado a diferentes niveles del sistema hidrotermal.

4.6.2.4. Tufo-Brecha. Como resultado de un posible proceso explosivo (Ocharan, Gladys.2003), después del emplazamiento del pórfido de cuarzo, se tiene el emplazamiento del tufo brecha en la parte central del Cerro Checocollo (Volfson y Yakovlev.1982). Esta unidad es de color blanco sucio a crema, dureza moderada con una relación matriz/fragmentos sistemáticamente uniforme en el rango de 70/30 a 80/20. Es polimíctica, tamaño de fragmentos entre 3 a 8 mm. La matriz está compuesta por sílice sacaroide y fragmentos finos de roca volcánica (1 a 2 mm.) fuertemente silicificada.

Sus afloramientos son escasos. Prácticamente se ha podido reconocer solamente tres siendo el más importante el que se ubica en la ladera oeste del Cerro Checocollo. Sus dimensiones son 50 m x 60 m y está cortado tanto al este como al oeste por dos cuerpos subverticales de tufisita blanca. El otro afloramiento importante se ubica 30 m a 40 m. al noreste del anterior, tiene forma semicircular y sus dimensiones son 20 m x 25 m.

4.6.2.5. Tufo-Fragmental. Comprendido también dentro del proceso explosivo magmático-hidrotermal (Ocharan, Gladys.2003) (Newhall and Dzurisin.1855), al fracturar el substratum produjo el emplazamiento de éste tipo de brecha en la nariz del pórfido de

cuarzo. La relación porcentual matriz/fragmentos es muy uniforme en casi todos los intervalos reportados por la perforación diamantina y fluctúa entre 70/30 a 80/20. Los fragmentos son de material volcánico, pórfido de cuarzo y muy raramente de rocas del substratum (cuarcitas y calizas fuertemente silicificadas). Los fragmentos son angulares a subangulares y ocasionalmente se observan fragmentos subredondeados (pebble dike). La matriz siempre conserva su aspecto tufáceo y el tamaño de grano es sacaroide y ocasionalmente limo. Prácticamente no existen minerales arcillosos, a pesar del tamaño reducido de la partícula que se observa en algunas muestras de mano. El análisis químico indica que el promedio de SiO_2 de estas rocas está en el rango de 97 a 99 % (fig. 13).

El aspecto “tufáceo” es variable (Volfson y Yakovlev.1982) pero en términos generales se incrementa y se hace más evidente en la periferia del sistema, adquiriendo ocasionalmente un color gris y la apariencia de un adobe. En este caso hay un predominio de los fragmentos de la roca caja (volcánico Huilacollo y/o pórfido de cuarzo) (fig. 13).

4.6.2.6. Tufisita. Continuando también dentro de la fase explosiva, tenemos la tufisita fácilmente reconocible tanto en el campo como en el núcleo de perforación, por su aspecto tufáceo fácilmente deleznable, tamaño de grano sacaroide y su color blanco sucio. La característica principal de ésta es su contenido de vacuolas perfectamente esféricas de dimensiones variables encontrándose en el rango de 1 a 10 mm. de diámetro. El contenido de vacuolas ocasionalmente alcanza 5 a 6 % del área de la sección estudiada.

En el campo de la especulación podría haberse formado por lixiviación de agregados cristalinos preexistentes. No hay evidencia de relictos que soporten tal posibilidad.

La única y la más aceptada es que durante el transporte ascendente de los tufos, estos estuvieron fuertemente cargados de volátiles que se quedaron atrapados durante su consolidación y posteriormente durante el enfriamiento, los gases migraron lentamente a las cajas, que fundamentalmente es sílice pulverulenta reducida a la fracción clástica de “limo” (1/16 a 1/256 mm.).

Parte importante de la tufisita, que corrobora su origen volcánico violento, es la ocurrencia de fragmentos angulosos a subredondeados de rocas de caja de diferentes tamaños (hasta 10 % de volumen). Estos fragmentos son de dos tipos: unos han sido arrancados de la roca caja y no han tenido mucho transporte vertical; mientras que hay otros de sílice negra y porosa, que parecen fueron transportados de niveles más profundos. Estos fragmentos a primera vista parecen ser escoria volcánica y/o roca de contacto de enfriamiento violento. Análisis petrográfico del material tobáceo pulverulento indican que gran parte de la sílice es cristobalita, lo que estaría indicando temperaturas de formación del orden de 900° C. Esto viene a corroborar que la tufisita se emplazó a temperaturas muy altas y por lo tanto no fue un lugar favorable para la deposición de minerales de alteración hidrotermal en la fase temprana y de formación de yacimiento.

4.6.3. Estructuras

El rasgo estructural más importante del área Checocollo-Caldero y sus alrededores lo conforma el Sistema de Fallas Incapuquio, manifiesto en el área como Falla Bellavista, subsidiaria de la misma. Ingresa con rumbo S75° E, con buzamiento 72° al NE, movimiento sinistral-inverso. Esta falla se enmascara en el Cerro Checocollo, pero en fotografías satelitales tiene continuidad hacia territorio chileno. Sin embargo puede verse claramente que los dos cuerpos intrusivos del área están perfectamente alineados en su traza.

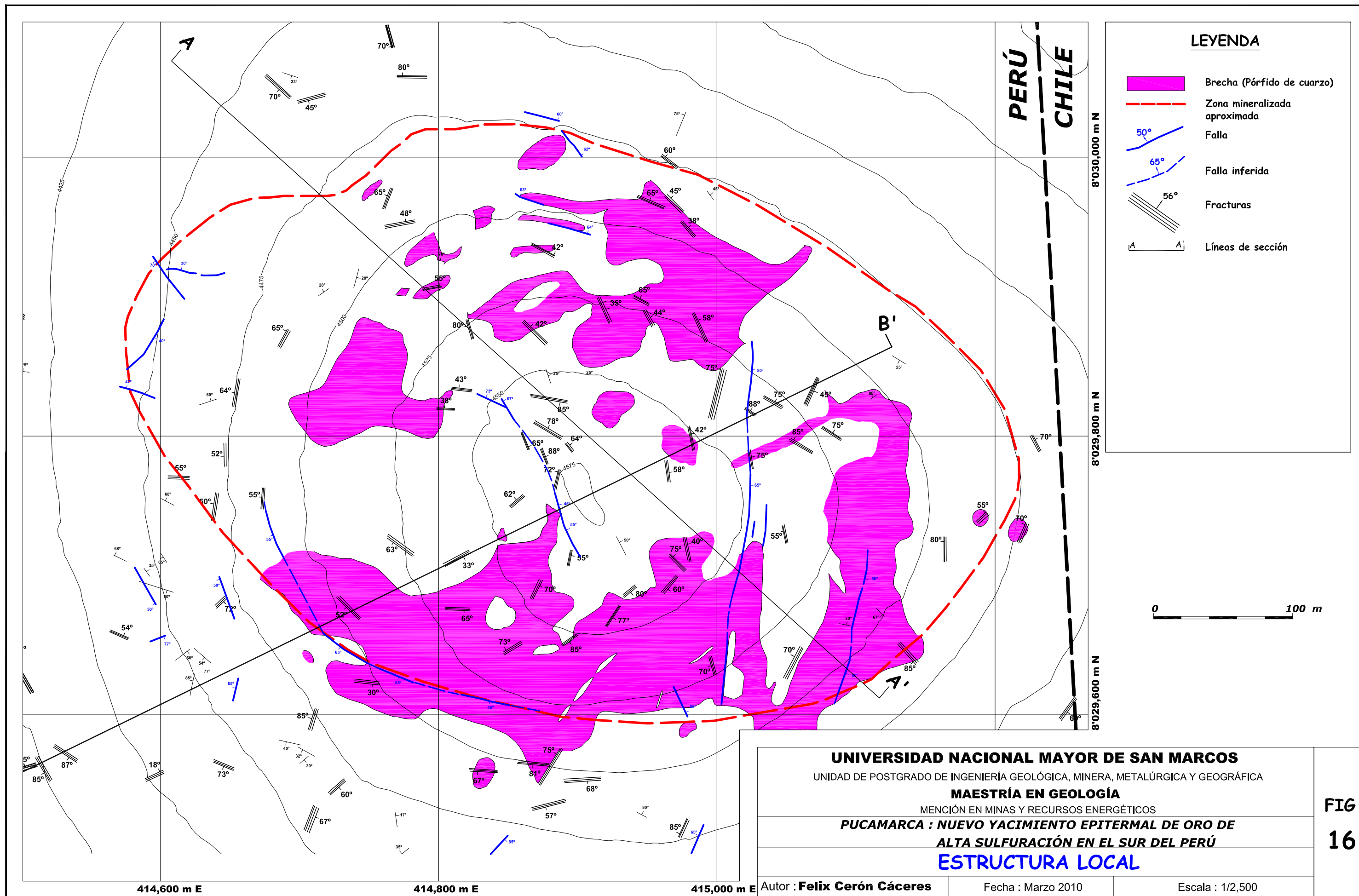
El segundo sistema importante es el denominado Norte-Sur, presente en el área en el sector este del cerro Caldero, con rumbo Norte-Sur y buzamiento 80° al este, con movimiento vertical inverso. Hacia el sur de Checocollo en los alrededores del cerro Challampa, en la traza de la falla se ha reconocido otros intrusivos de composición granodiorítica y pórfido de *cuarzo*.

El tercer sistema presente es de rumbo N 30° - 60° E, con buzamientos de 75° a 80° sureste-noroeste y movimientos indistintos; tiene mejor expresión en el sector Sur-suroeste del Cerro Checocollo en donde se observa crestones silicificados, débilmente mineralizados.

En forma conjunta la diatrema presenta un fracturamiento circular divergente reconocido en el terreno e interpretado como una expresión de esfuerzos verticales profundos en sentido ascendente tipo "pistón". Todo el molde estructural en el Cerro Checocollo tiene igual importancia en los procesos de alteración-mineralización, como puede verse en los planos geológicos, pero podría especularse que el Sistema de Fallas Incapuquio facilitó el emplazamiento de grandes masas intrusivas pero los sistemas SW-NE y Norte-Sur favorecieron el desarrollo de los sistemas hidrotermales quizás debido a sus características más de tensión que de compresión (figs. 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 16).

4.6.4. Alteración Hidrotermal

La alteración en el Cerro Checocollo no es típica de un sistema ácido-sulfato (alta sulfuración) (Volkert, Mc Ewan y Garay, 1999), sin embargo la alteración es intensa para la silicificación (Tabla 1), siendo ésta, parte de un patrón zonal, con sílice porosa y sílice masiva en la parte central que grada hacia los bordes a sílice-alunita (argílica avanzada), arcilla-caolinita y sílice, clorita, piritita y calcita (propílica) (figs. 28, 29 y 30).



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
UNIDAD DE POSTGRADO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
MAESTRÍA EN GEOLOGÍA
MENCION EN MINAS Y RECURSOS ENERGÉTICOS
PUCAMARCA : NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE
ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ
ESTRUCTURA LOCAL

Autor : **Felix Cerón Cáceres**

Fecha : Marzo 2010

Escala : 1/2,500

FIG
16

Tabla 1: Análisis por Elementos Químicos Principales en Rocas de la Diatrema Pucamarca. El análisis por elementos químicos principales de rocas, en muestras de reconocimiento tomadas en el cerro Checocollo en donde se encuentra la diatrema de Pucamarca, indican altos porcentajes de SiO₂ que se observan incluso en las rocas de los volcánicos Huilacollo (cajas) indican las condiciones de extrema acidez de los fluidos hidrotermales que actuaron durante los procesos de alteración hidrotermal en la diatrema en donde se encuentra el yacimiento epitermal de Pucamarca (AMEC (Perú) SA.2006).

Unidad	Al ₂ O ₃ %	CaO %	Cr ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	K ₂ O %	MgO %	MnO %	Na ₂ O %	P ₂ O ₅ %	SiO ₂ %	TiO ₂ %	LOI %	Total %
Volcánico Huilacollo	0.34	0.01	<0.01	1.15	0.02	0.06	<0.01	0.04	0.02	96.44	0.58	0.29	98.95
Tufo Fragmental	1.19	0.11	<0.01	0.89	0.07	0.13	0.01	0.07	0.02	94.60	0.49	0.83	98.41
Tufo Brecha	0.27	0.03	0.02	0.95	0.02	0.07	<0.01	0.04	0.01	95.38	0.51	0.56	98.31
Brecha (Pórfido de Cuarzo)	0.37	0.03	0.03	1.59	0.02	0.07	0.01	0.04	0.02	95.59	0.61	0.26	98.64
Brecha Híbrida	0.21	0.01	0.01	0.49	0.01	0.06	<0.01	0.03	0.01	97.17	0.43	0.43	98.86

Fuente. Datos tomados de AMEC (Perú) SA. 2006.

4.6.4.1. Sílice Masiva. Alteración que le da a la roca una textura microcristalina y densa; ha sido reconocida superficialmente en la cumbre oeste-suroeste del Cerro Checocollo, concordante más con el mayor fracturamiento que con el aspecto litológico, pues afecta a todas las rocas sin excepción. Se piensa que ésta sílice se produce por interacción de aguas meteóricas frías de baja acidez, con fluidos ascendentes ácidos a alta temperatura (Sillitoe, R. 1996); lo que podría estar indicando la existencia de un nivel freático en ésta área relacionado posiblemente a un ambiente lagunar existente entre los volcánicos Huilacollo y los volcánicos Huaylillas (litología más permeable), restos consistentes en tobas dacíticas finamente bandeadas reconocidas en el Cerro Caldero y en algunas zonas del Cerro Checocollo; razón por la cual ésta sílice no profundiza como

puede verse en las secciones, quedándose colgadas como un cascarón.

Esta alteración va asociada a minerales como el cinabrio, rejalgar, azufre nativo, alunita blanca y algo de hematita.

4.6.4.2. Sílice Masiva Oquerosa. Tipo de sílice variante entre la sílice masiva y la oquerosa, reconocida únicamente en la cumbre del Cerro Checocollo y ubicada cerca de la nariz del intrusivo pórfido de cuarzo y concordante a su vez con el centro de la diatrema en donde se tiene el principal canal alimentador de fluidos, como se puede ver en la sección adjunta, que profundiza en dirección Este-sureste, hacia territorio chileno.

Su asociación con otros minerales es similar a la sílice masiva aunque predominan en mayor cantidad dada su característica más porosa, pero minerales como el rejalgar, cinabrio y azufre tienden a declinar a profundidad.

4.6.4.3. Sílice Oquerosa. Proceso más importante en la diatrema Pucamarca; manifiesta principalmente hacia los bordes de la misma afectando también a las cajas de la misma; tiende claramente a profundizar. Se piensa que se forma cuando los fluidos magmáticos ascendentes se condensan al entrar en contacto con rocas saturadas con agua, que originan fluidos ácidos y como consecuencia lixivian la roca.

Este proceso ha obliterado todas las unidades litológicas presentes dificultando muchas veces la identificación de las rocas. Un corte idealizado desde el centro de la máxima alteración hidrotermal hacia sus bordes, presenta a la brecha híbrida y al pórfido de cuarzo fuertemente silicificados y fracturados, distribuidos a manera de un

casquete en forma de cono invertido, descansando en el pórfido de cuarzo. El tufo brecha que es el pulso más antiguo de la estructura diatrema, muestra clara evidencia de la silicificación en menor intensidad que la observada a otras unidades. Los diques de tufisita y la brecha fragmental exhiben una mayor silicificación y es por ello que se considera a la silicificación un proceso intermitente, que habiendo actuado desde la fase final de la consolidación del pórfido de cuarzo, decayó en intensidad, hasta prácticamente ser mínima durante el emplazamiento de los diques de tufisita. La excepción la constituyen algunos diques (0.5 m a 1.5 m.) de sílice de color crema de aspecto masivo que posiblemente fueron de tufisita y posteriormente silicificada. La silicificación continuada y la actividad tectónica intermitente produjeron inicialmente brechamiento y luego silicificación. Un examen detallado de 80 secciones delgadas ha permitido establecer siete fases de brechamiento-silicificación.

Hacia fuera la diatrema está en contacto con los volcánicos de la Formación Huilacollo, la silicificación es menor que en el tufo brecha ó en la brecha híbrida.

Esta sílice se asocia con oropimente, rejalgá, cinabrio, azufre nativo y jarosita, con tendencia a predominar a profundidad únicamente jarosita.

4.6.4.4. Argílica Avanzada. Este tipo de alteración (alunita-caolinita-montmorillonita-pirita) escasa en el Cerro Checocollo pero abundante en el Cerro Caldero, se ubica principalmente como marginal a la sílice, en la caja de la diatrema (volcánico Huilacollo) y en el pórfido andesítico. Frecuentemente también se le ubica en el pórfido de cuarzo y en el tufo fragmental.

4.6.4.5. Argílica. Se presenta debajo de la zona de alunita, asociada principalmente a arcillas y algo de pirita. Se le ha reconocido más abundante en el Cerro Caldero, pero también existe en el Cerro Checocollo, principalmente en los volcánicos Huilacollo y en el pórfido andesítico.

4.6.4.6. Propílica. La zona argílica grada hacia las márgenes del sistema, a un ensamble verdoso compuesto de clorita, pirita, calcita, epídota y algo de sílice. Está ubicada en la caja de la diatrema, principalmente en los volcánicos Huilacollo y en el pórfido andesítico a manera de halo periférico.

4.6.5. Mineralización

La mineralización observada en el Yacimiento Pucamarca es de dos tipos: sulfuros y metales preciosos en la fase de óxidos. La mineralización sulfídica ocurre principalmente en el cerro Caldero; mientras que el 90 % del mineral oxidado se encuentra en el Cerro Checocollo.

En el Cerro Checocollo la mineralización de sulfuros se presenta como parches aislados de calcocita-bornita-covelita y pirita subordinada. Esta ocurrencia no es frecuente, y en los núcleos de perforación observados, no excede los 10-15 mm. de sección. Los valores de oro se incrementan en presencia de los sulfuros de cobre, lo que ha originado la hipótesis de una mineralización de sulfuros más extensa, la que posteriormente habría sido oxidada y los valores de oro redistribuidos en todo el sistema. El análisis de los elementos traza sugiere una correlación directa entre Au y As, Sb y Hg. Estos elementos son típicos en ambiente epitermal y no son frecuentes en el sistema pórfido cobre-oro-molibdeno. Por lo tanto es un tanto arriesgado querer encontrar una relación del oro-plata con una facie

sulfídica inicial. Se acepta sin embargo que inicialmente existió una fase de más alta temperatura, en la cual se depositó los sulfuros de cobre y hierro en forma discontinua y restringida, principalmente a las unidades litológicas: Brecha híbrida, Volcánicos Huilacollo, Pórfido Andesítico y ocasionalmente Tufo-Brecha. Ésta fase deposicional habría sido oxidada y parcialmente destruida por las soluciones hidrotermales ascendentes que dieron lugar a la deposición del oro y la plata. No se ha observado el ensamble de sulfuros en las tufisitas ó en el pórfido de cuarzo.

La mineralización de metales preciosos, fundamentalmente oro y plata, es del tipo diseminado, está asociada a una fase deposicional de más baja temperatura que la sulfídica y se caracteriza por la asociación de oro libre, oropimente-rejalgar-cinabrio y azufre nativo (figs. 17 a 27).

Ésta asociación es la típica del ambiente epitermal (Heyl y Wayne.1999), en la cual la plata se presenta algunas veces asociada al oro (electrum) (Ocharan, Gladis.2003), como sulfosales y raramente plata nativa. En Checocollo la plata ocurre como sulfosales o acantita (argentita de baja temperatura). La relación con el oro en algunos casos es directa, pero también se presenta independiente principalmente en la zona periférica donde se llega a registrar valores de hasta 50 60 ppm. de plata.

El comportamiento de los elementos traza (MINSUR SA. 2006-Informe privado) (AMEC (Perú).2006) (Tabla 2) es el establecido en otros yacimientos epitermales de características similares. El antimonio, mercurio y azufre muestran un fuerte incremento cuando los valores de oro y plata son más altos. El arsénico siendo elemento importante del sistema epitermal, no guarda una relación tan directa; sin embargo es el elemento traza más característico y fácilmente visible por la presencia de oropimente y rejalgar (Bradford, Jhon. 1999, Candiotti y Guerrero. 1999, Mayta Oscar.1999).

2. MINERAGRAFIA

MUESTRA DDH -29 (206-208m)

MINERALIZACION Fe(Cu-Sb-As-Ag-Au), moderada-débil

COMPOSICION

Minerales Principales	Accesorios	Trazas
Hematina	Pirita (py) Rutilo (ru)	Calcopirita Tennantita-Tetraedrita (tttn) Digenita Oro Nativo (Au) Plata Nativa (Ag) (Pirargirita-Proustita)

OBSERVACIONES

Mineralización de hematita que rellena microoquedades, reemplaza algunos pseudomorfos de pirita; y en ciertas áreas la ganga está caracterizada por una fina diseminación de hematita y óxidos de titanio que son el producto de alteración de una titanomagnetita precedente.

En ciertas áreas, la hematita está asociada a cuarzo euhedral y oro libre que no supera a las 20 micras. La pirita en forma de aislados y pequeños agregados que están asociados con trazas de calcopirita. Localmente se observa abundantes reflejos internos de color rojizo asociados con los cobres grises. Estos pueden indicar una fina diseminación de pirargirita-proustita cuya identificación microscópica no es posible sin microanálisis por sus dimensiones muy diminutas (Por SEM se ha determinado que estas no sobrepasan a las 5 micras). La mineralización ha sufrido una alteración supérgena incipiente que se manifiesta en el reemplazamiento de los sulfuros primarios de cobre por digenita.

100 micras

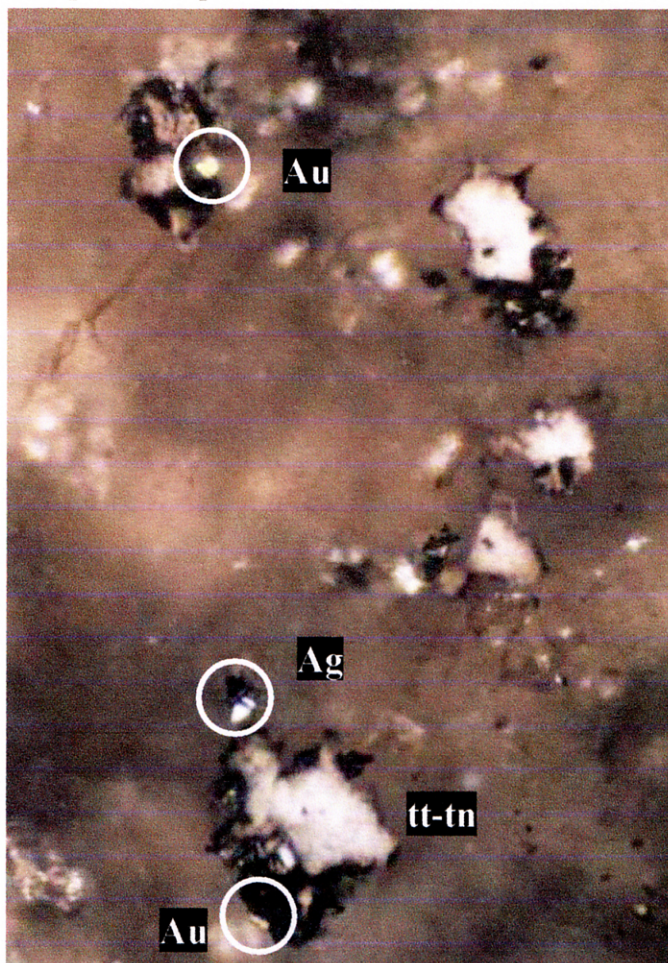
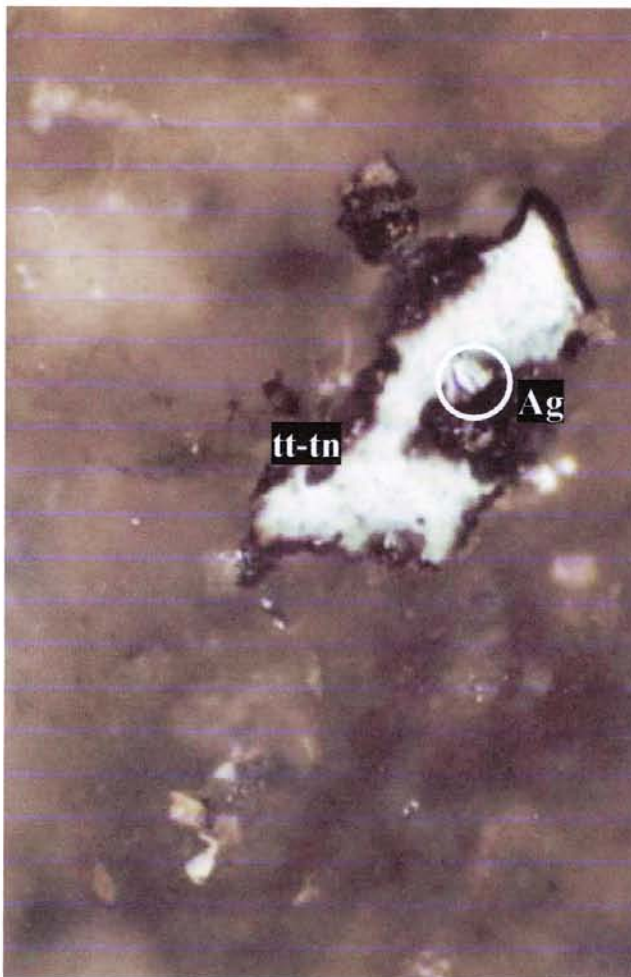


Fig. 17 .-Estudio minerográfico de la muestra DDH-29 (206-208 m).

1. MINERAGRAFIA

MUESTRA: DDH -29 (206-208m)

500 micras



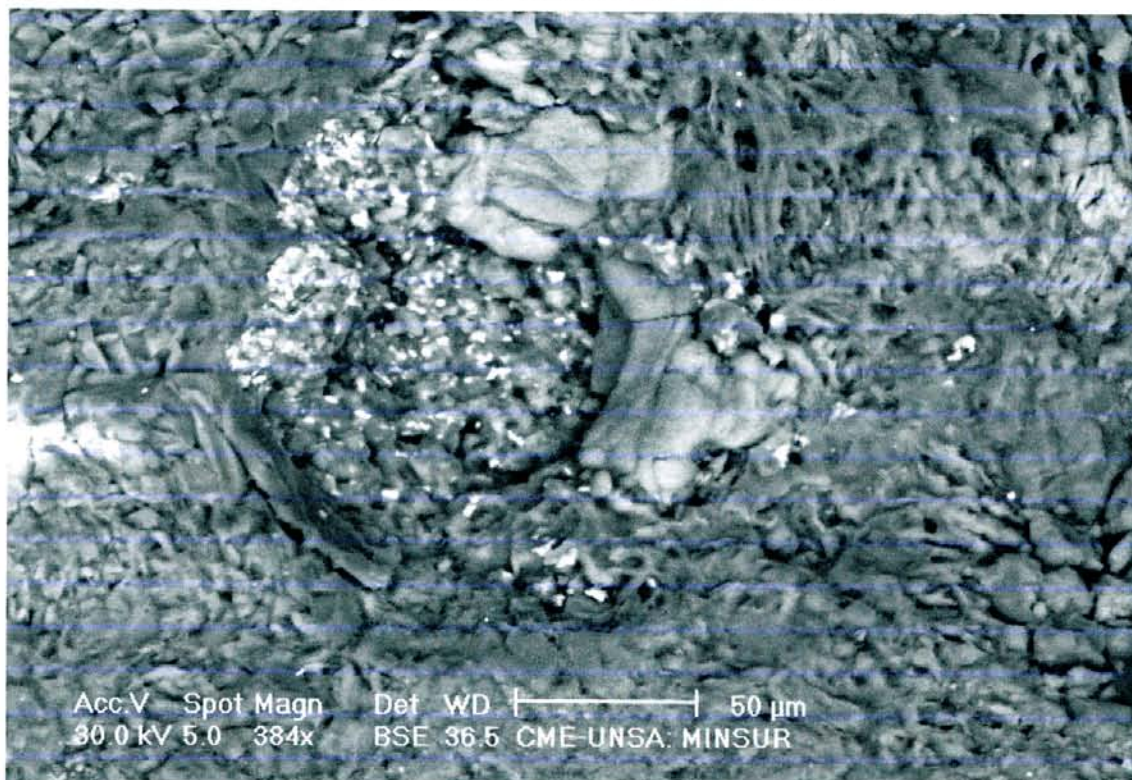
MUESTRA: DDH -29 (206-208m)

500 micras



Fig 18.- Estudio mineragráfico de la muestra DDH – 29 (206-208 m)

3. MICROSCOPIA ELECTRONICA Y MICROANALISIS



Se ha efectuado el estudio de la muestra de testigo de perforación DDH -29 (206-208m), en un Microscopio Electrónico de Barrido con sistema de microanálisis, modelo SEM XL20 + EDX del Centro de Microscopía Electrónica de la Universidad de San Agustín de Arequipa y en un en un ESEM XL30+EDX del Centro Nacional de Rehabilitación-DF-México; ambos de FEI COMPANY. Los microanálisis areales y puntuales en diferentes zonas de la muestra determinan una composición predominante de cuarzo de tres generaciones que presentan diferente forma y tamaño, con cantidades subordinadas de montmorillonita, illita, rutilo, leucoxeno y óxidos de hierro (identificados como hematita). Con trazas de baritina, pirita, calcopirita, plata nativa, tennantita con

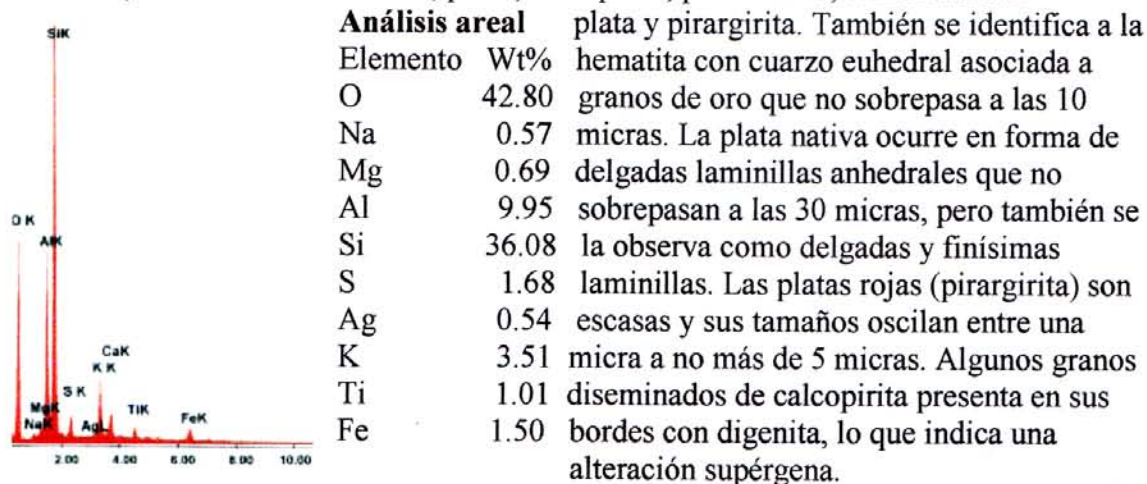
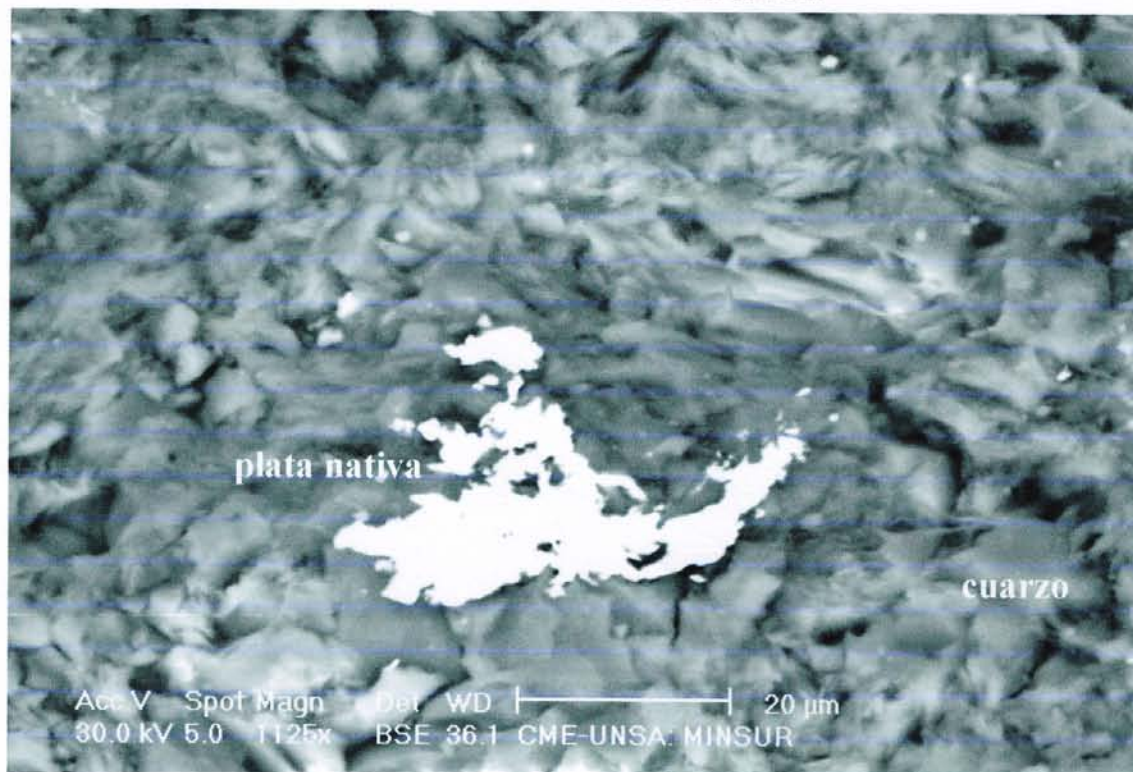


Fig. 19.- Estudio microanalítico de la muestra DDH-29 (206-208m)

3. MICROSCOPIA ELECTRONICA Y MICROANALISIS



Análisis puntual de plata nativa + cuarzo

Elemento Wt%

O 32.57
Si 38.99
S 0.59
Ag 26.80
Fe 0.54
Cu 0.51

Análisis puntual de pirargirita

Elemento Wt%

S 18.79
Ag 59.34
Sb 21.87

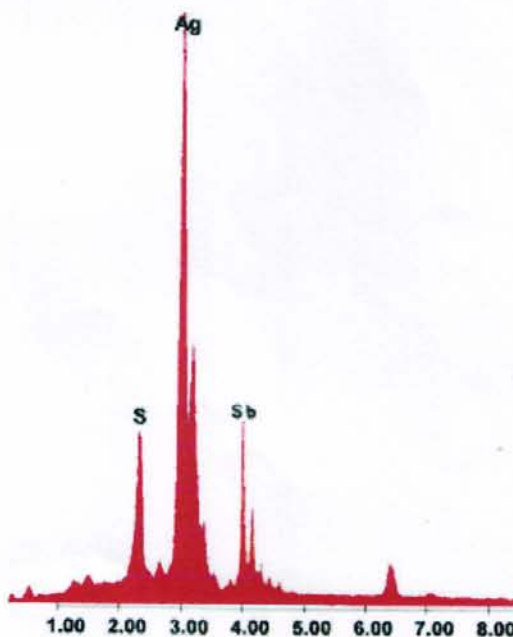
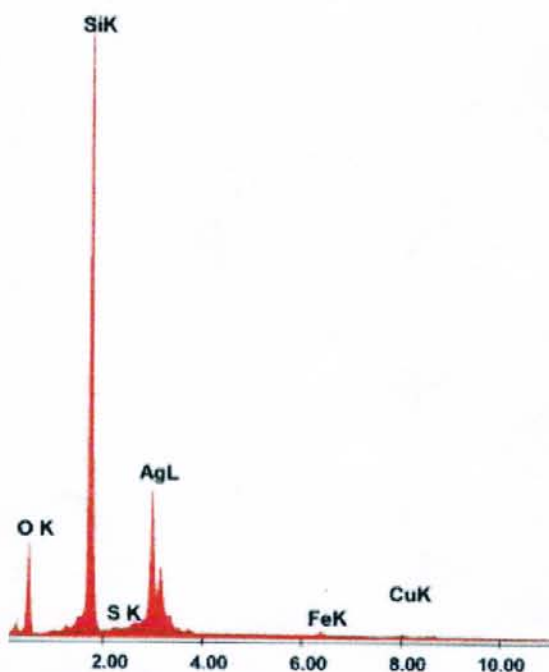
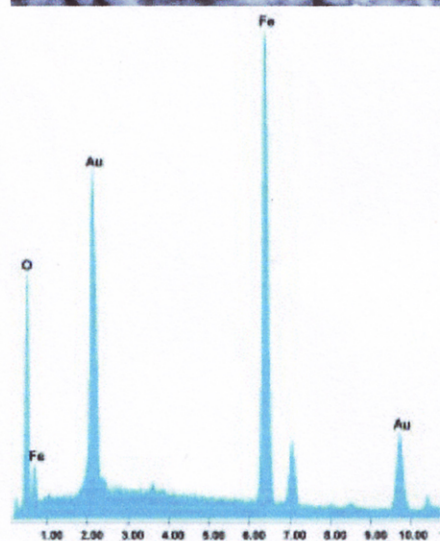
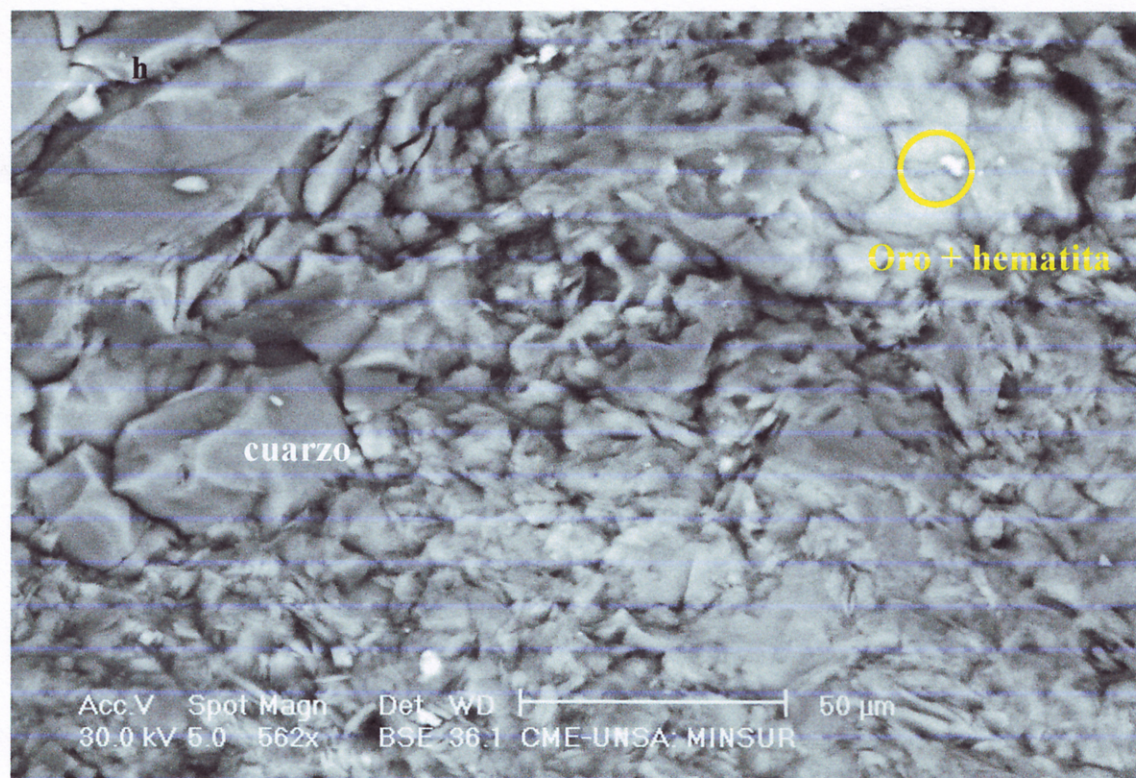


Fig. 20.- Estudio microanalítico de la muestra DDH-29 (206-208).

3. MICROSCOPIA ELECTRONICA Y MICROANALISIS



Análisis puntual oro+ hematina

Elemento	Wt%
O	20.20
Fe	41.12
Au	38.68

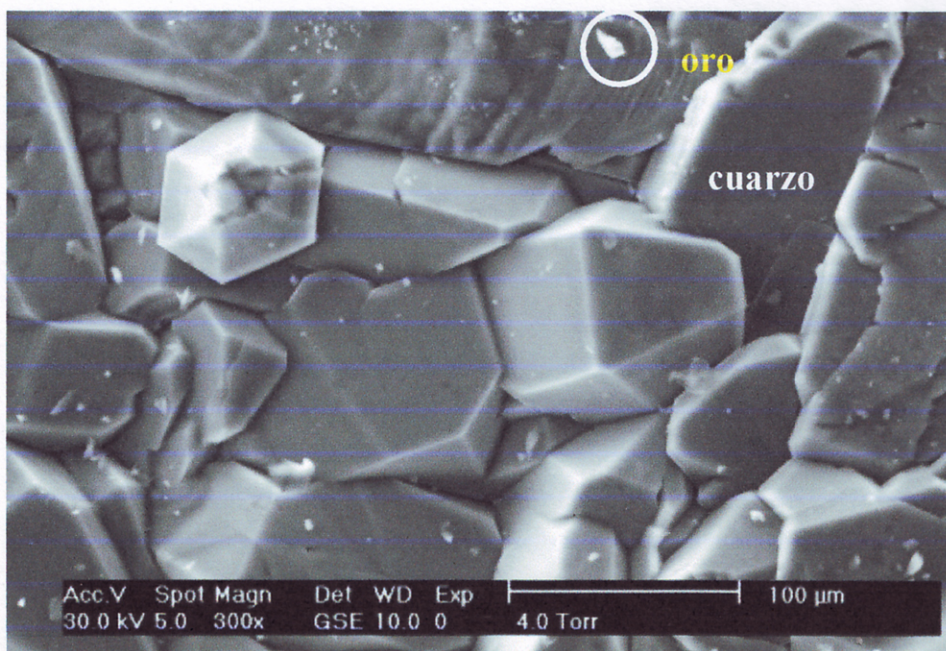
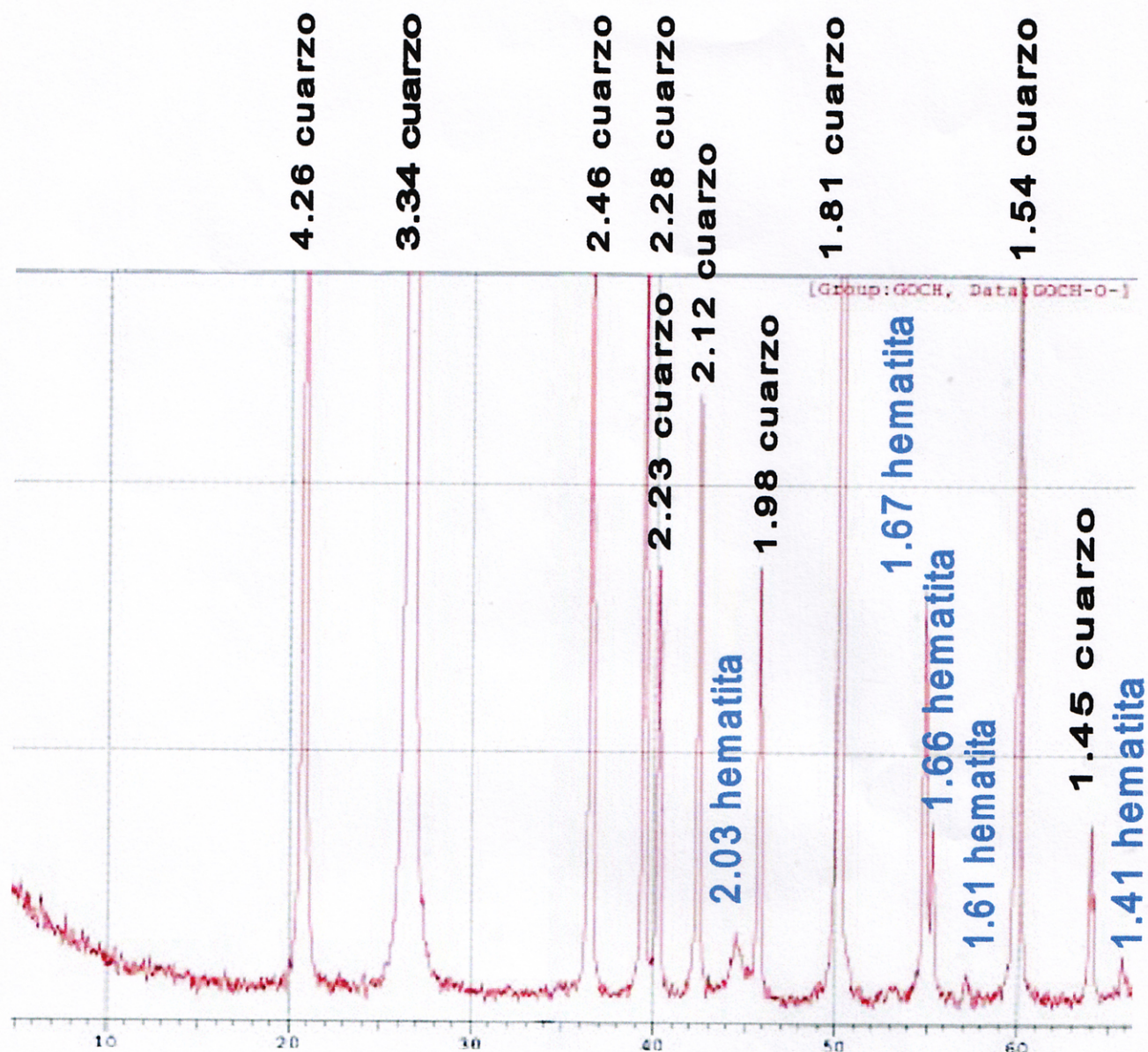


Fig.21.-Estudio microanalítico de la muestra DDH – 29 (206-208 m)

4. DIFRACCION DE RAYOS-X

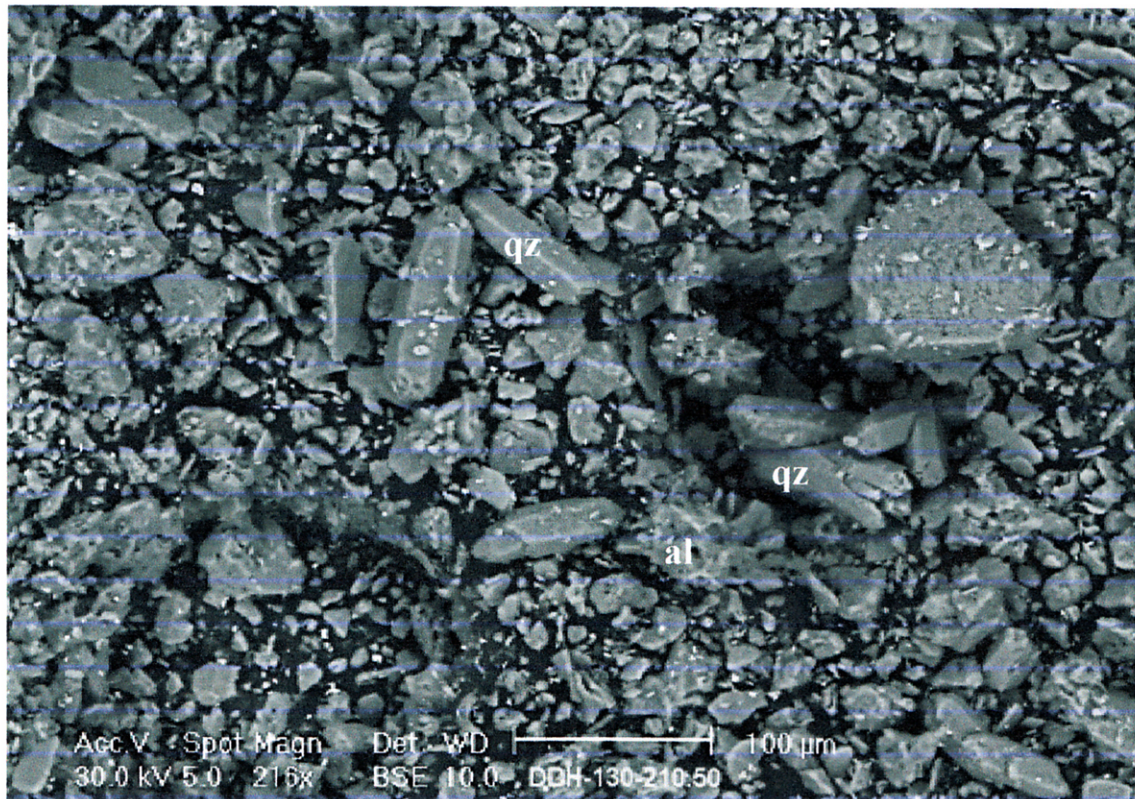


Muestra DDH-29(206-208m). El diagrama de rayos - X, determina que mayoritariamente la muestra está constituida por cuarzo en aproximadamente un 90% y subordinadamente cantidades accesorias de hematita.

Fig. 22 .- Estudios microanalítico de la muestra DDH-29 (206 – 208 m).

ESTUDIO MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO, y MICROANALISIS POR EDX

MUESTRA DDH-130 (210.50m)



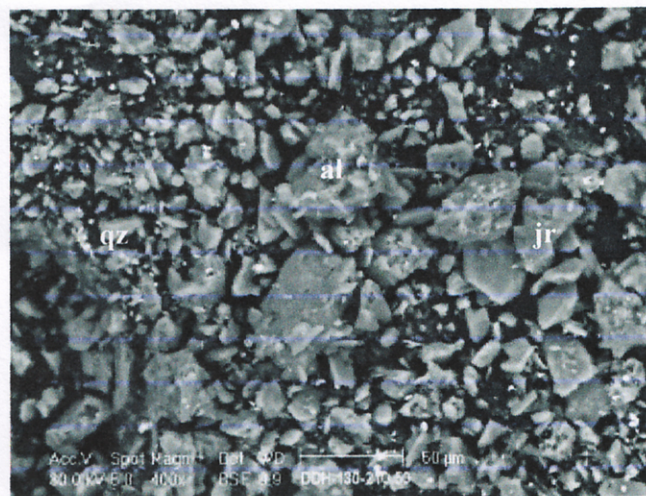
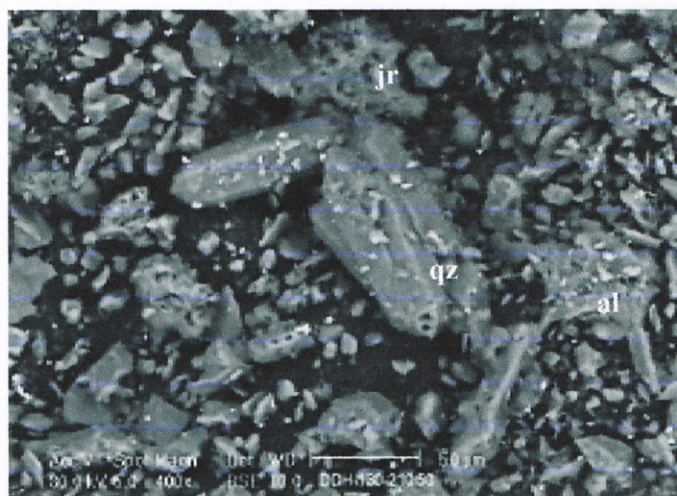
La muestra fue analizada en un microscopio electrónico de barrido, modelo (ESEM XL30 + EDX4i), de FEI Company; del Centro Nacional de Rehabilitación-Distrito Federal México.

Para los análisis areales y puntuales en diferentes áreas de la muestra, se usó el detector de electrones retrodispersados (BSE); cabe indicar que este es un análisis elemental no destructivo y repetitivo (simultáneamente analiza 85 elementos comprendidos entre el boro y el uranio), que fue efectuado para determinar la presencia de oro y otros elementos que al estén relacionados con él. Los valores son dados en porcentaje de peso atómico de cada elemento (Wt%).

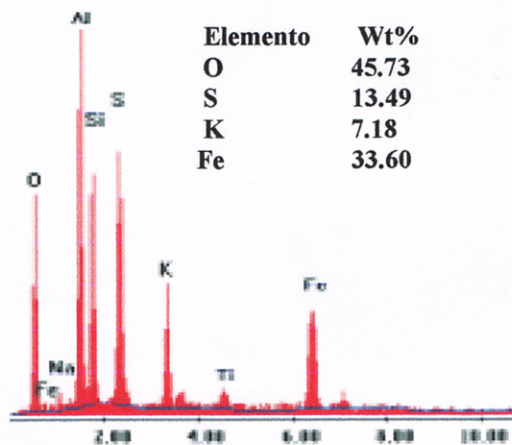
La muestra corresponde a material deleznable, está constituida mayoritariamente (71.30 %) por cuarzo que se presenta en forma de partículas libres de diferentes tamaños, son de formas anhedrales y subhedrales con un buen porcentaje en cristales euhedrales; con alunite (20.23%) accesoria, en forma subhedral y anhedral de similar tamaño que el cuarzo, subordinadamente en un porcentaje que no supera el 5.23% de jarosita (jr) y kaolinita (kao); con trazas en un porcentaje que no supera el 3.24% de hematita (hm), goethita (goe), rutilo (ru). Las asociaciones de alunite con metales nobles no ha sido determinada, pero no se descarta su presencia en este tipo de muestras.

Fig. 23.- Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.50 m).

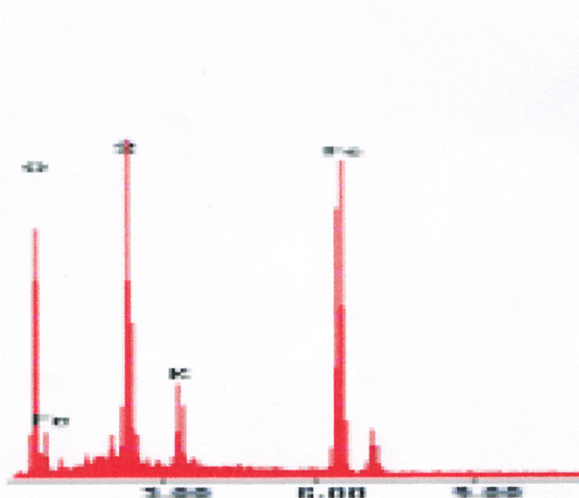
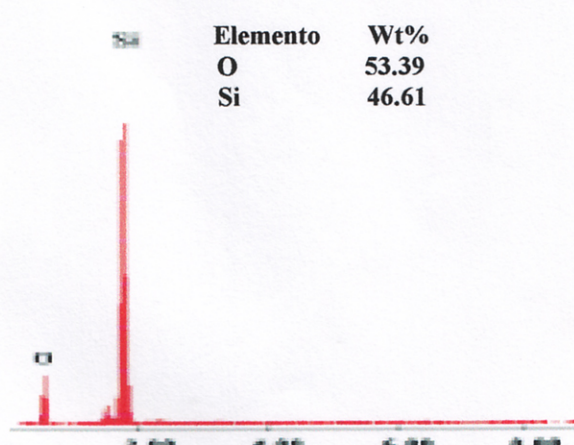
ESTUDIO MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO, y MICROANÁLISIS POR EDX



Análisis puntual de jarosita (jr)



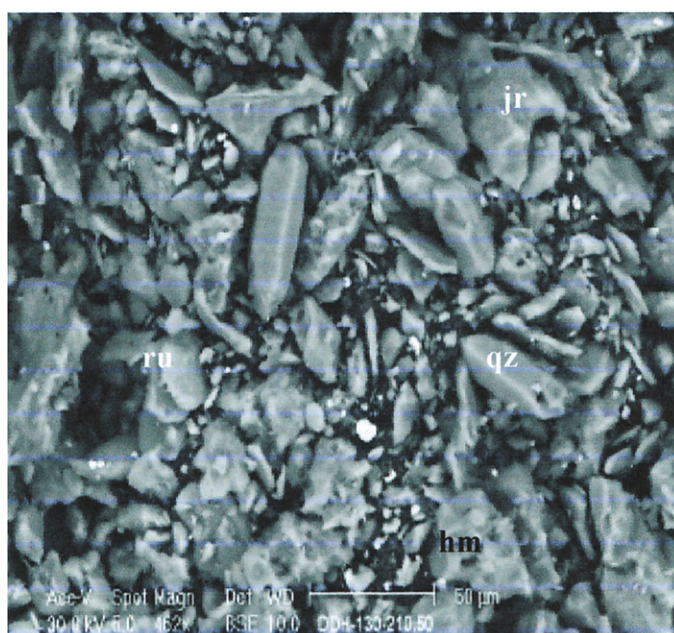
Análisis puntual De cuarzo (qz)



Análisis total	
Elemento	Wt%
O	34.12
Na	1.45
Al	17.69
Si	46.61
S	13.81
K	6.09
Ti	1.37
Fe	33.60

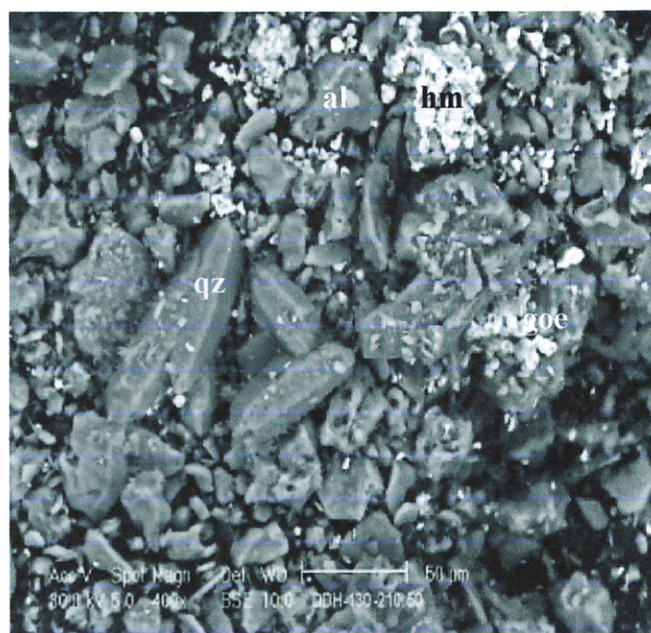
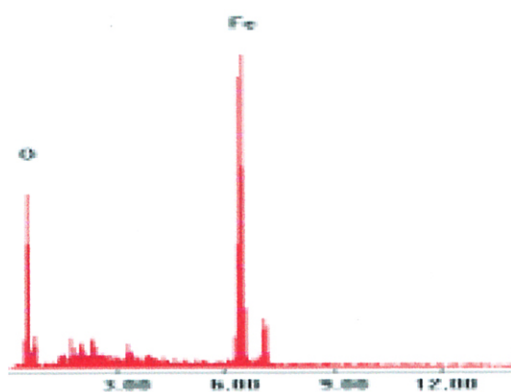
Fig. 24.- Estudio microanalítico de la muestra DDH- 130 (210.50m).

ESTUDIO MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO, y MICROANALISIS POR EDX



**Análisis puntual
de goethita (goe)**

Elemento	Wt%
O	36.98
Fe	63.02



**Análisis puntual
de hematita (hm)**

Elemento	Wt%
O	31.05
Fe	69.95

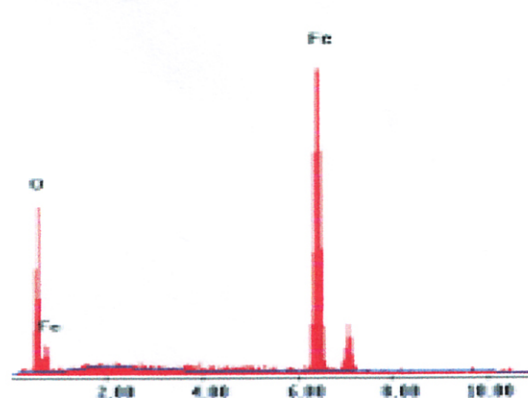
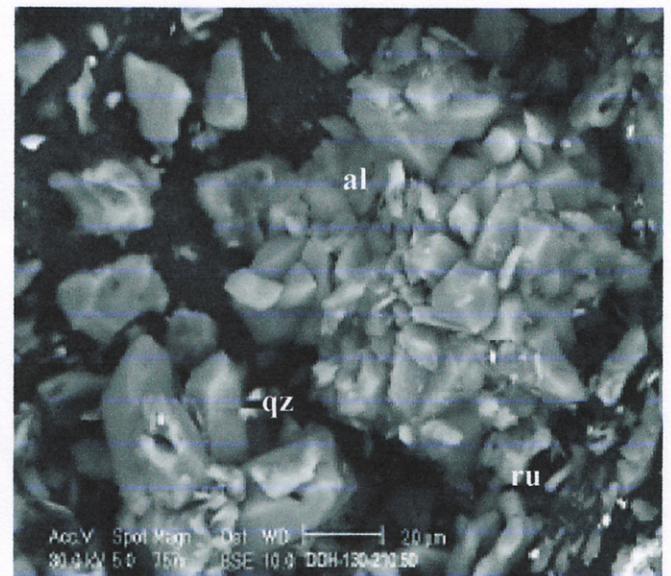
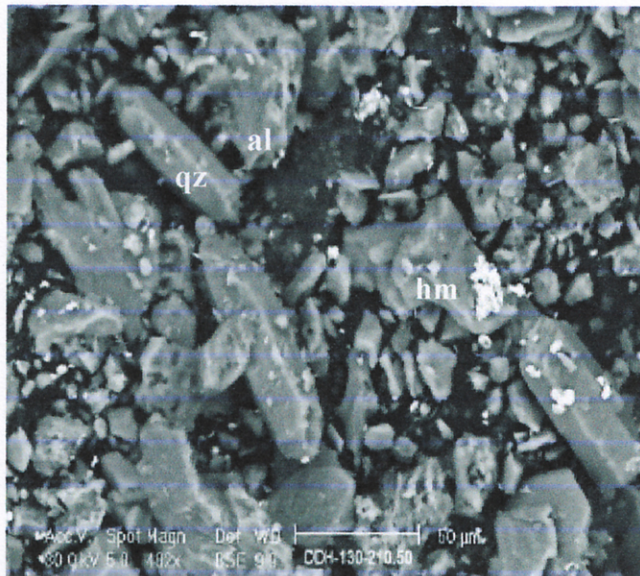


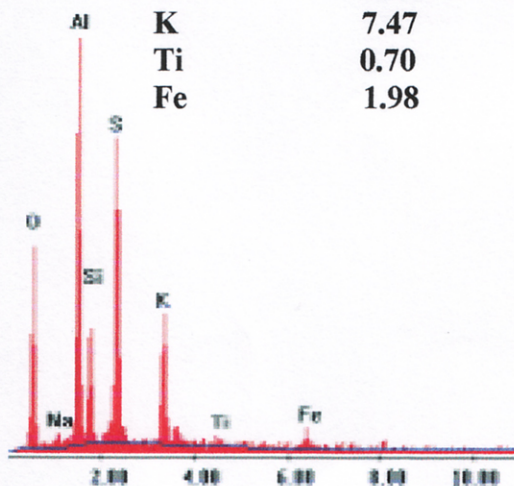
Fig. 25 .- Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.50m)

ESTUDIO MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO, y MICROANÁLISIS POR EDX



Análisis total

Elemento	Wt%
O	42.25
Na	1.53
Al	20.30
Si	8.99
S	16.79
K	7.47
Ti	0.70
Fe	1.98



Análisis total

de alunita (al)	Elemento	Wt%
	O	54.76
	Al	19.39
	S	15.19
	K	10.76

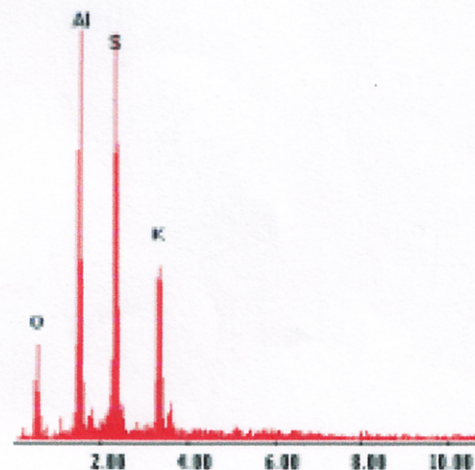


Fig. 26 .- Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.50m).

ESTUDIO MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO, y MICROANALISIS POR EDX

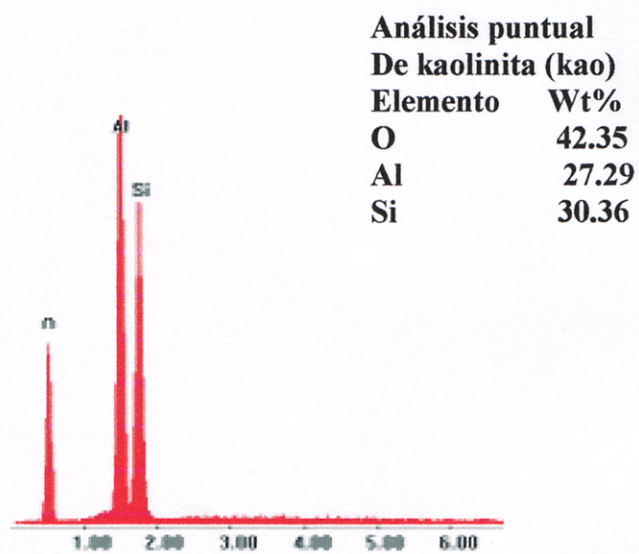
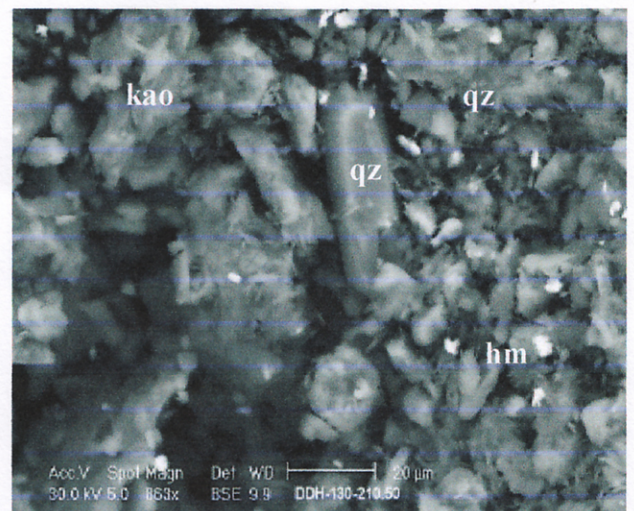
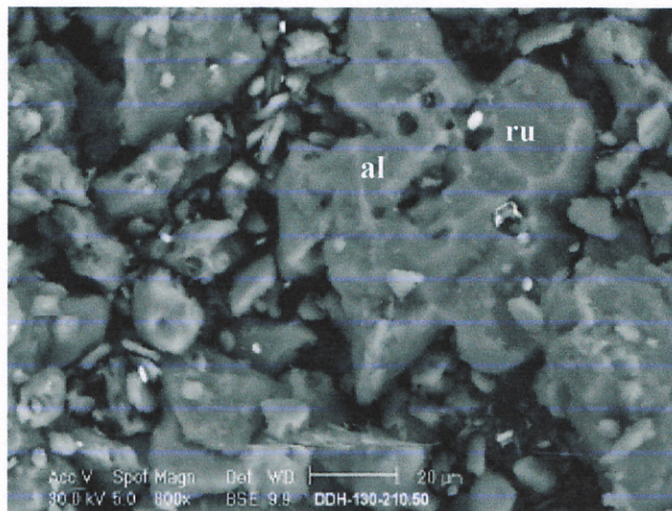


Fig. 27.- Estudio microanalítico de la muestra DDH-130 (210.50m)

Tabla 2: Análisis de Elementos Traza en Rocas de la Diatrema

Pucamarca. El análisis geoquímico por algunos elementos traza tomados en muestras de reconocimiento (AMEC (Perú) SA. 2006) en rocas de la diatrema Pucamarca indican valores anómalos para elementos como Ag, Ba, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb y W.

Unidad	Ag mg/l	Ba mg/l	Co mg/l	Cr mg/l	Cu mg/l	Ga mg/l	La mg/l	Mo mg/l	Ni mg/l	Pb mg/l	Sr mg/l	Ti mg/l	U mg/l	V mg/l	W mg/l	Zn mg/l
Volcánico Huilaocollo	2	66.1	1.2	40	54	1.0	2.2	50	29	145	13.2	<0.5	1.1	24	73	20
Tufo Fragmental	4	778	71	10	458	2.1	2.9	10	158	220	40.3	<0.5	2.45	32	1,730	44
Tufo Brecha	16	158.5	1.2	30	41	2.6	1.8	11	12	62	11	<0.5	1.34	32	32	33
Brecha (Pórfido de Cuarzo)	4	196.5	1.9	100	60	1.4	1.9	32	38	72	10.6	<0.5	1.0	29	54	65
Brecha Híbrida	6	94.8	1.2	70	27	0.8	1.5	11	10	14	8	<0.5	0.63	18	13	20

Fuente. Datos tomados de AMEC (Perú) SA. 2006.

Los valores de arsénico a nivel del promedio local (background) están en el rango de 200 a 250 ppm y se reportan valores altos como 1,000 a 2,000 ppm y ocasionalmente otros que llegan a 10,000 ppm. Un examen cuidadoso indica que estos valores altos de arsénico no están relacionados a mineralización cuprífera (enargita).

El comportamiento del mercurio es similar. En algunos intervalos el cinabrio es visible y en algunos ensayos el mercurio llega hasta 57 ppm de Hg. El valor promedio local para el yacimiento está en el rango de 1 a 2 ppm de Hg y el valor umbral alrededor de 5 a 6 ppm.

El molibdeno elemento siderófilo con gran afinidad por la sílice se presenta en Checocollo en cantidades que varían entre 1 y 20 ppm. El valor promedio local (background) está en el rango de 1 a 2 ppm y el umbral (threshold) es 5 a 6 ppm. No se ha observado molibdenita.

El antimonio reporta sistemáticamente valores por debajo de 25 ppm.

4.6.5.1. Relación de la Mineralización con la Alteración Hidrotermal. La mineralización de oro está relacionada con el proceso de silicificación en sus diferentes grados, no habiéndose encontrado valores económicos fuera del sistema. La roca silicificada es a su vez la preferida para la deposición mineral a excepción de la sílice densa; sin embargo cuando está fuertemente fracturada se convierte en buena receptora (figs. 28, 29 y 30).

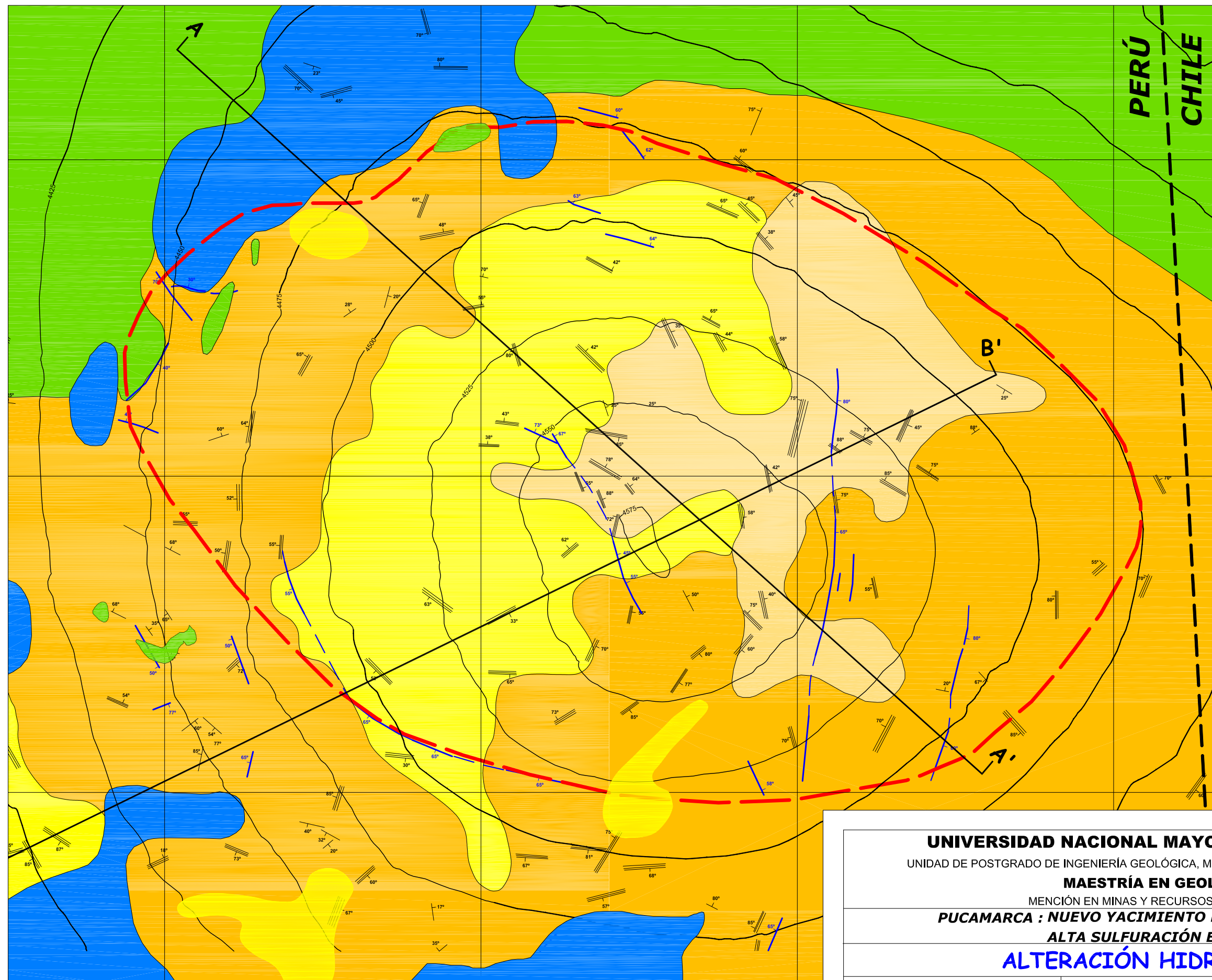
Por otra parte parece ser que la base mineralógica favorable para encontrar las zonas mineralizadas está marcada por la presencia de alunita-caolinita, montmorillonita y hematita (Ocharan, Gladis.2005), que en términos generales está sobre la cota 4,300 msnm.

La facie argílica ocasionalmente presenta valores de oro en el rango de 0.5 a 1.0 gr Au/TM, pero en la propílica, que es periférica a todo el sistema los valores están en el rango de 0.1 a 0.2 gr Au/TM.

4.6.5.2. Relación de la Mineralización con la Litología. La distribución de oro se da en la parte superior y central del Cerro Checocollo, siendo este un núcleo de alta ley (2.38 gr. Au/TM) y las rocas receptoras son la brecha híbrida, el tufo brecha y la tufisita, en su conducto central. Hay otros cuerpos satélites de menor ley que se presentan alrededor de éste y se proyectan a profundidades por 200 a 250 metros. Estos cuerpos son de forma tabular y otros cilíndricos.

Los diques de tufisitas tienen un comportamiento dual en cuanto al contenido aurífero.

Hay intervalos mineralizados (0.5 a 2.0 gr Au/TM) pero de igual manera existen otros que son totalmente estériles o tienen valores por debajo de 0.5gr Au/TM.



LEYENDA

- Sílice masiva
- Sílice masiva oquerosa
- Sílice oquerosa
- Argílica (alunita)
- Propílica
- Zona mineralizada aproximada
- Falla
- Falla inferida
- Fracturas
- Líneas de sección

0 100 m

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

UNIDAD DE POSTGRADO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

MAESTRÍA EN GEOLOGÍA

MENTIÓN EN MINAS Y RECURSOS ENERGÉTICOS

PUCAMARCA : NUEVO YACIMIENTO EPITERMAL DE ORO DE

ALTA SULFURACIÓN EN EL SUR DEL PERÚ

ALTERACIÓN HIDROTERMAL

Autor : **Felix Cerón Cáceres**

Fecha : Marzo 2010

Escala : 1/2,500

FIG
28

4.6.5.3. Relación de la Mineralización con las Estructuras.

Considerando la diatrema como una estructura, tenemos la distribución del oro, en la parte superior y central del Cerro Checocollo, tiene la forma de un cono invertido que penetra en forma subvertical hasta la cota 4400 m, esto es a 130 metros de profundidad.

Es a partir de este nivel base y hacia arriba, por los siguientes 250 a 300 metros, que la mineralización auro-argentífera se depositó. En profundidad existe por lo menos 8 a 10 centros o canales que parecen fueron los canales alimentadores (figs. 10, 11 y 12).

Otro factor importante que podría haber favorecido la deposición mineral, es el efecto “tapón” del pórfido de cuarzo ayudado por la posición de “cascarón” que presenta la sílice masiva, interactuando como factor litológico.

4.7 Ubicación del Yacimiento Epitermal de Pucamarca dentro de un Estilo de Alta Sulfuración

La evaluación efectiva de un yacimiento epitermal de oro requiere establecer, si es de un estilo de alta o baja sulfuración. Los distintos orígenes de los estilos resultan en diferencias en las características geoquímicas de la mineralización; es por ello que usando estas diferencias químicas generalizadas, guiando el esfuerzo de estudios geoquímicos, la correcta aplicación del zonamiento de alteración, el escenario geológico y condiciones hidrológicas podemos acercarnos a ubicar un yacimiento dentro de un estilo de mineralización.

En tal sentido después de haber descrito las características geológicas del yacimiento epitermal de Pucamarca dentro de un ámbito regional y local además de presentar avances en su

geoquímica podemos postular que Pucamarca es un yacimiento epitermal de alta sulfuración por las siguientes razones:

4.7.1. Ambiente Estructural

Pucamarca está ubicada en un centro intrusivo ubicado dentro de un sistema de fallamiento regional, indicando una relación proximal subvolcánica diferente a relaciones más distales en baja sulfuración.

4.7.2. Tamaño

Si bien no es determinante, los yacimientos de alta sulfuración presentan dimensiones equidimensionales.

4.7.3. Mineralogía Económica

Presencia de oro, plata, electrum, novelita, bornita, calcocita, oropimente, rejalgar, cinabrio, asufre nativo, hematita, ensamble típico de alta sulfuración. La ausencia de enargita-tennantita-tetrahedrita podría deberse a una deficiencia del ión cobre en las soluciones hidrotermales mineralizantes.

4.7.4. Mineralogía de Ganga

Alunita, caolinita, illita, montmorillonita nos indican condiciones ácidas de un ambiente de alta sulfuración.

4.7.5. Alteración

La silicificación intensa y extensa acompañada de lixiviación ácida con generación de sílice oquerosa, la alteración argílica avanzada-argílica (argílica-alunita), nos indican condiciones ácidas extremas de un ambiente de alta sulfuración. Ausencia de adularia y calcita (baja sulfuración) corroboran estas condiciones.

4.7.6. Ph

La intensa silicificación-lixiviación ácida (Tabla 2) nos indica condiciones de Ph bajo en comparación a Ph cercano a neutro típico de yacimientos de baja sulfuración. La mineralización de Pucamarca está asociada a la alteración más ácida (alta sulfuración).

4.7.7. Textura

En Pucamarca no existen vetas, por lo tanto texturas de relleno como son bandeamientos y crustificación no están presentes ya que ellas normalmente no son observables en alta sulfuración.

4.7.8. Conclusión

Pucamarca es un yacimiento epitermal de alta sulfuración, alojado en una diatrema. Sobreentendiéndose que estudios más avanzados que podrían realizarse posteriormente como son inclusiones fluidas, podrán dar indicios de salinidad, geotermometría, paragénesis y zoneamiento, que ayudaran a reafirmar este postulado.

4.8. Estudio Comparativo del Yacimiento Epitermal Pucamarca con otros Similares en el Perú y el Mundo

4.8.1. Generalidades

La presencia de un yacimiento aurífero de filiación epitermal emplazado en una diatrema, como es el caso de Pucamarca, justifica un estudio comparativo con otros similares en el Perú y el mundo.

La similitud de dichas características con depósitos peruanos como es el caso de Quicay y Marcapunta en Cerro de Pasco; Kelian Mine y Rosia Montana en Indonesia y Rumanía respectivamente, sugirió un potencial económico aún no debidamente evaluado para éste tipo de yacimientos sobre todo en Perú.

En la literatura metalogénica ésta clase de depósitos epitermales auro-argentíferos recibe la denominación de yacimientos de oro en diatremas volcánicas.

En el Perú los yacimientos de oro ocurren a lo largo de todo el país, preferentemente en la Cordillera de Los Andes y casi siempre asociados a extensas zonas de alteración hidrotermal. A lo largo de todo el eje volcánico de Los Andes existen numerosos centros volcánicos de diferente composición: Calcoalcinos y shoshoníticos se distribuyen en lineamientos NNW, relacionados a fallas regionales por lo general a lo largo de la Divisoria Continental. Las edades detectadas en éstos centros volcánicos varían desde el Terciario (Mioceno inferior, Mioceno superior, con 10 a 15 Ma) a Cuaternario con 01 a 03 Ma (Pleistoceno).

Las lavas de los volcanes han depositado productos de diferente composición, sobreyaciendo a rocas sedimentarias terciarias y batolíticas. Los volcanes más antiguos del Mioceno presentan conos intensamente erosionados, con coladas, conos y domos no siempre

reconocibles, que en la mayoría de los casos la erosión ya ha descubierto en ellas un núcleo de alteración hidrotermal solfatárica o alteración argílica avanzada que es lo que identifica en superficie a los yacimientos minerales epitermales.

En el mundo la mayoría de los depósitos epitermales están situados alrededor del margen Circun-Pacífico y en Los Cárpatos, asociados a la Orogénesis Alpina.

Con el fin de realizar el análisis comparativo, se recopiló diferentes estudios de yacimientos similares en el Perú y el mundo, destacando los trabajos recientes, publicados en eventos especializados en difundir informaciones al servicio del desarrollo minero-geológico del Perú y el mundo.

4.8.2. Modelo Conceptual para Yacimientos Epitermales Auro-Argentíferos en Diatremas Volcánicas

Estos yacimientos se dan en marcos extensionales y transtensionales, comúnmente en arcos volcánicos-plutónicos de márgenes continentales, en zonas con emplazamiento magmático de alto nivel, asociados a calderas, complejos de domos de flujo, diatremas, bordes de diatremas y otras estructuras volcánicas, a menudo relacionadas con stocks subvolcánicos, diques y brechas. Se postula que sobreyacen y están relacionados genéticamente con sistemas de pórfidos cupríferos en intrusiones mineralizadas.

La mineralización se aloja en las brechas con oquedades, stockworks, estructuras orientadas y reemplazos de sulfuros variando desde bolsones hasta lentes masivos en secuencias volcánicas asociadas a sistemas hidrotermales someros, caracterizados por lixiviación ácida, alteración argílica avanzada y silíceas.

La mineralización suele ser de edad terciaria a cuaternaria, menos comúnmente mesozoica y raras veces en volcánicos paleozoicos. Su mena principal suele ser pirita, enargita, luzonita, calcosina, covelita, bornita, oro, electrum, calcopirita, esfalerita, tetrahedrita, tenantita, galena, marcasita, arsenopirita, sulfosales de plata y telururos. Dos tipos de menas están presentes comúnmente: Enargita-pirita masiva y/o cuarzo- alunita-oro. La ganga está conformada por cuarzo, pirita y raramente baritina.

Como textura es característica la sílice oquerosa, que es un producto residual de lixiviación ácida (hidrólisis extrema).

La mineralogía de alteración está conformada por cuarzo, caolinita, dickita, alunita, hematita, baritina, arcillas amorfas, sílice, pirofilita, diáspora, corindón, turmalina, topacio, jarosita, azufre nativo, cinabrio y rejalgar.

La alteración argílica avanzada es característica y puede ser extensa. El cuarzo se presenta como reemplazo de grano fino y característicamente como sílice oquerosa residual.

Las investigaciones recientes muestran que estos depósitos pueden relacionarse genéticamente a intrusiones de alto nivel, con múltiples etapas de mineralización, presumiblemente relacionadas a tectonismo periódico, con actividad intrusiva relacionada y generación de fluidos hidrotermales.

Las dimensiones de estos yacimientos son muy variables, desde aquellos explotables masivamente, de bajo tenor y gran tonelaje a otros de alta ley que deben explotarse selectivamente.

4.8.2.1. Marco Litológico. En la mayoría de los casos los depósitos epitermales están relacionados de forma espacial y temporal con vulcanismo subaéreo de carácter ácido a intermedio, y el

subvulcanismo asociado, pudiendo el basamento ser de cualquier tipo. El encajonante volcánico suele ser del tipo central a proximal, muy típicamente con rocas efusivas o piroclásticas (Sillitoe, RH. 1993).

Un gran número de depósitos epitermales están asociados a estructuras de origen volcánico, en especial calderas y complejos andesíticos.

El origen de los cuerpos de brecha en el caso de las diatremas y otros cuerpos con una matriz de polvo de roca es bien conocido. Ellos siempre tienen una fuente de calor, cual es una intrusión y son abiertos a la superficie. Erupcionan como un géiser, depositando un halo de materia fina (Atkinson, W; Skewes, Milka y Stern, Charles. 2007).

Estas diatremas por lo general cortan terrenos no volcánicos y suelen tener fragmentos derivados de rocas a gran profundidad. Éstos fragmentos pueden ser angulares o redondeados y son girados y cementados. Frecuentemente hay un cambio gradual hacia fragmentos que no muestran ninguna rotación y también de clastos que no sean separados por mucha distancia. La materia entre los clastos es la matriz que actúa como soporte de la brecha y que usualmente es polvo de roca.

4.8.2.2. Controles Estructurales. La distribución de los depósitos epitermales coincide, no solo con arcos volcánicos en márgenes convergentes (subducción de placa oceánica-continental ú oceánica-oceánica), sino también con los rifts de tras-arco asociados (Camprubí, Antoni; Albinson, Tawn. 2006).

Las diatremas y yacimientos asociados con ellas se ubican en las zonas lineales de las dislocaciones de ruptura (fallas regionales), en las flexiones de las dislocaciones, en los lugares de conexión de las

grietas con las dislocaciones principales, en las zonas de conexión de varios sistemas de fisuras que limitan las diatremas de forma escalonada en el plano (Volfson, F.I; Yákovlev, P.D..1982).

Otra particularidad de las diatremas es la existencia de dislocaciones circulares, semicirculares ó cónicas (Pucamarca) y, en ciertos casos también radiales.

La forma de las diatremas tienen en planta forma tubular, cilíndrica, circular ó semicircular. Frecuentemente se tropieza con cuerpos cónicos fungiformes y en forma de diques, con menos frecuencia cuerpos tubulares con contactos escalonados abruptos, que están limitados por varios sistemas de grietas tectónicas (Volfson, F.I; Yákovlev, P.D. 1982).

4.8.2.3. Terminología y Descripción de las Mineralizaciones. La denominación de los términos de alta y baja sulfuración fue propuesta por Hedenquist (1985) en base al estado de oxidación-reducción (ó sulfuración) del azufre en los fluidos de sistemas geotérmicos actuales.

Recientemente se han redefinido los tipos de depósitos epitermales, introduciéndose el término de sulfuración intermedia (Hedenquist, J.W., Arribas, A.R., y Gonzáles – Urien, E., 2000). Los depósitos del subtipo de sulfuración intermedia son estructuralmente muy similares a los de baja sulfuración, pues no en balde ambos conforman el conjunto de epitermales alcalinos, aunque las características geoquímicas de los fluidos mineralizantes asociados y de las mineralizaciones metálicas en sulfuración intermedia suelen guardar una mayor afinidad con los depósitos de alta sulfuración.

Las mineralizaciones en diatremas dentro del ámbito de alta y baja sulfuración están asociados con fluidos ácidos que se generan en el

ambiente magmático hidrotermal adyacente a volcánicos activos. Las características de estas asociaciones mineralógicas indican estados de oxidación similares a aquellos medidos en sistemas magmático-hidrotermales activos. En los fluidos hidrotermales los componentes reactivos derivados de la fuente magmática relativamente oxidada ascienden hasta cerca de la superficie con muy poca interacción agua-roca en profundidad. El vapor rico en SO_2 y HCl puede ser absorbido por el agua subterránea causando SO_2 a desproporcionar el H_2SO_4 y H_2S , seguido por la disolución del H_2SO_4 y HCl . El agua caliente resultante (200 a 300° C) altamente ácida (pH 0 a 2) y oxidante, reacciona fuertemente con la roca ambiente a profundidad hasta alterarla (Hedenquist, J. W.,1995).

Aunque existen muchos minerales que se encuentran en todos los estilos de yacimientos, hay diferencias claras de mineralogía económica, alguna de las cuales reflejan las distintas condiciones redox de los fluidos hidrotermales. Una distinción es la presencia común de esfalerita y de arsenopirita en yacimientos de sulfuración baja a intermedia, mientras que la esfalerita es escasa y la arsenopirita es rara en los yacimientos de alta sulfuración. A diferencia de los ejemplos de sulfuración baja ó intermedia, los yacimientos de alta sulfuración comúnmente contienen minerales arsenicales de cobre, especialmente las sulfosales de alta sulfuración-enargita y luzonita. Dichos sulfuros incluyendo los del estado de sulfuración relativamente alta, tenantita y tetrahedrita son relativamente raros ó están ausentes en yacimientos de baja sulfuración. La abundancia total de minerales sulfurados (dominantemente pirita) no es significativa, porque puede estar en cualquiera de los estilos, alta intermedia ó baja (White, Noel C; Hedenquist, Jeffrey W..1995) (Tabla N° 3).

Los minerales de ganga asociados con los tres estilos de mineralización epitermal muestran una considerable superposición, aunque también hay claras diferencias que reflejan la reacción pH del

fluido cambiante. El cuarzo es común en los tres estilos. La adularia y la calcita, ambas indicando condiciones de pH cercanas a neutro, son minerales comunes en yacimientos de baja sulfuración, pero están ausentes en yacimientos de sulfuración alta e intermedia.

Tabla 3: *Minerales de Mena en Yacimientos Auríferos de Alta, Intermedia y Baja Sulfuración (frecuencia de abundancia)*

	<i>Alta sulf.</i>	<i>Sulf.intermedia</i>	<i>Baja sulf.</i>
Pirita	abundante	abundante	abundante
Esfalerita	común	común	común
Galena	común	común	común
Calcopirita	común	común	común
Enargita-luzonita	abundante	común	raro
Tenantita-tetrahedrita	común	común	común
Covelita	común	común	poco común
Estibnita	raro	común	poco común
Oropimente	raro	raro	raro
Rejalgar	raro	raro	raro
Arsenopirita	raro	común	común
Cinabrio	raro	común	poco común
Electrum	poco común	común	común
Oro nativo	común	común	común
Telururos-Seleniuros	poco común	común	común

Fuente. Tomado de White.Noel C.: Hedenquist, Jeffrey W. 1995.

Los minerales formados bajo condiciones relativamente ácidas, como caolinita y alunita además de pirofilita, diáspora son comunes en yacimientos de alta sulfuración. En yacimientos de baja sulfuración, la alunita no se presenta como mineral hipógeno y la caolinita hipógena es rara; sin embargo, ambos minerales son muy comunes en áreas

afectadas por sobreimpresión causada por percolación descendente de aguas sobrecalentadas y ácidas sulfatadas (White, Noel C; Hedenquist, Jeffrey W. 1995) (Tabla N° 4).

Tabla 4: *Minerales de Ganga en Yacimientos Auríferos de Alta, Intermedia y Baja Sulfuración (frecuencia de abundancia)*

	<i>Alta sulf.</i>	<i>Sulf. intermedia</i>	<i>Baja sulf.</i>
Cuarzo	abundante	abundante	abundante
Calcedonia	poco común	pococomún	poco común
Calcita	ausente	rara	común
Adularia	ausente	común	común
Illita	poco común	común	común
Caolinita	común	común	rara
Pirofilita-diáspora	común	común	ausente
Alunita	común	común	ausente
Baritina	común	común	común

Fuente. Tomado de White.Noel C.: Hedenquist, Jeffrey W. 1995.

4.8.2.4. Estilo ó Forma de Mineralización y Texturas. La mineralización epitermal de alta sulfuración en diatremas y brechas hidrotermales se da como diseminaciones muchas veces irregulares, dependiendo de la permeabilidad del encajonante durante la mineralización; aunque muy pocos depósitos presentan un solo estilo (sulfuración intermedia); de allí la importancia del estilo o forma de mineralización a la hora de clasificar los depósitos epitermales.

Las texturas típicas de los yacimientos de alta sulfuración o intermedia es la de cuerpos masivos de cuarzo cavernoso, aunque vetas locales y brechas pueden ser importantes huéspedes para minerales de alta ley. El cuarzo cavernoso aparece por lixiviación

ácida, con un pH inferior a 2, que deja espacios abiertos y sílice residual: Éste residuo cristaliza como cuarzo, con un cuarzo adicional y pirita depositados a partir de una solución. Vetas de sulfuro masivo ó bandeado que consisten de pirita y enargita también pueden cortar los cuerpos de cuarzo cavernoso. Cabe resaltar que las texturas de los minerales económicos y de ganga en el caso de yacimientos de sulfuración intermedia podrían ser similares a los de baja sulfuración, es decir bandeamientos, cuarzo crustiforme y vetas de calcedonia, drusas etc.

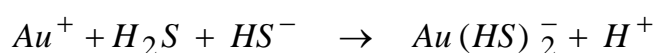
4.8.2.5. Consideraciones Geoquímicas. (Tomadas de Camprubí, Antoni; Albinson, Tawn. 2006).

- Origen de los Componentes y Concentración en los Fluidos Mineralizantes. Reacción con las Rocas Encajonantes. El vulcanismo submarino y el hidrotermalismo son responsables de la deposición de metales básicos en la corteza oceánica y de su alteración. Éste proceso conlleva la hidratación de las rocas que constituyen la corteza en formación y la incorporación a ella de elementos tomados del agua marina, tales como azufre y cloro. La posterior deposición de sedimentos también incorpora a la corteza metales diversos, é igualmente atrapa agua marina. Durante la subducción se produce la deshidratación de los sedimentos oceánicos incorporados y de las rocas hidratadas de la placa subducente (caso Sudamérica). La liberación de agua durante éste proceso metamórfico es la responsable de la fusión *parcial* del manto suprayacente a la zona de Benioff. Seguidamente los magmas producidos por dicho mecanismo empiezan a ascender a través del manto, primero, y de la corteza, después, diferenciándose é interactuando de diversas formas con las rocas encajonantes. Por lo tanto hay una gran variedad de posibles fuentes de los componentes que luego serán fundamentales para la deposición mineral en la corteza continental, incluyendo el agua marina, la

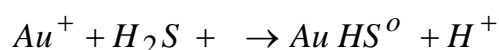
corteza oceánica subducida y sus sedimentos, el manto y la propia corteza continental.

Los fluidos magmáticos derivados de cuerpos intrusivos someros relacionados con la formación de depósitos epitermales experimentan en profundidad una desmezcla, durante la cual gran parte del agua y del H_2S migran a la fase vapor. Éste al enfriarse, se recondensa en forma de aguas de naturaleza mixta magmática-meteórica, rica en H_2S y en consecuencia, con un alto potencial de disolución y removilización de cantidades significativas de oro en forma de complejos tiosulfurados.

- **Transporte de Metales.** La especie $Au(HS)_2^-$ es muy estable a pH aproximadamente neutro, según la reacción:



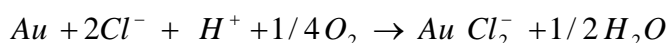
Lo que indica que cantidades de oro geológicamente significativas, en cuanto a su capacidad de poder originar depósitos económicos, pueden ser transportados por un fluido hidrotermal típico. En condiciones más ácidas, como las de los epitermales de alta sulfuración ó en las zonas de “raíz” de los fluidos ascendentes en epitermales de baja sulfuración y sulfuración intermedia, la especie $AuHS^0$ es la dominante, aunque los fluidos en los de alta sulfuración están relativamente oxidados y sean de salinidad ligeramente superior a lo normal, según la reacción



Sin embargo, en un rango de temperatura de 250° a 350°, condiciones muy comunes para la formación de depósitos epitermales, la especie portadora de oro dominante será

$HAu(HS)_2^0$ en la mayoría de condiciones de deposición mineral en que los fluidos se encuentran en equilibrio con pirita y/o pirrotita.

En el mismo rango de temperatura la especie $Au(HS)_2^-$ será más importante para el transporte de oro que $HAu(HS)_2^0$ a pH sobre 5.5. Solo en un fluido rico en cloro, pobre en H_2S y con pH ligeramente ácido (menos de 4.5) para un rango de temperatura de 250° a 350°, el oro será transportado como complejo clorurado según la reacción



En cuyo caso se espera que el oro esté asociado con un alto contenido de plata y metales básicos, ya que se considera que Ag, Pb, Cu y Zn son transportados predominantemente como complejos clorurados.

- **Mecanismos de Precipitación Mineral.** Por lo común se consideran dos mecanismos físicos principales para la precipitación mineral en depósitos epitermales: Ebullición y mezcla de fluidos. Estos mecanismos no suelen presentarse desligados, sino que se complementan produciendo la deposición mineral. Por mezcla de fluidos en cuanto a la precipitación mineral dentro del ambiente epitermal debe entenderse una mezcla dentro del ambiente epitermal entre aguas meteóricas descendentes y unos fluidos hidrotermales ascendentes, sea cual sea el origen de éstos últimos. Los fluidos hidrotermales pueden ser en si mismos el resultado de la mezcla en profundidad de aguas meteóricas y magmáticas. Respecto a la ebullición, en base a estudios termodinámicos se considera que la presencia de calcita hojosa reemplazada por cuarzo (pérdida de CO_2), presencia de adularia (aumento de pH por

pérdida de CO₂) pasando de la estabilidad de la illita al de la adularia, presencia de truscottita (silicato de calcio y aluminio hidratado), común en menas de oro de alta ley y presencia de sílice amorfa ó de calcedonia, indicando que se ha producido un enfriamiento brusco del fluido a temperatura de deposición entre 100° y 190°, y una sobresaturación de sílice en el fluido indicarían que se ha producido ebullición. Otras evidencias de ebullición durante la deposición mineral son la presencia de horizontes de alteración ácida debidas a aguas calentadas por vapor y hasta cierto punto la presencia de brechas de fracturación hidráulica.

La mezcla de fluidos profundos con aguas frías marginales ó con aguas freáticas calentadas por vapor, tanto si son de carácter ácido-sulfatado como carbonatado (ricos en CO₂), también pueden provocar la saturación del oro. Se han reportado en numerosas ocasiones evidencias de mezclas de fluidos tanto en depósitos de alta sulfuración como de sulfuración intermedia y baja, en base a datos microtermométricos de inclusiones fluidas é isotópicas de O y H, como factor posible para la precipitación mineral.

La mezcla de fluidos ascendentes con aguas calentadas por vapor ricas en CO₂ ó bien aguas freáticas frías suelen provocar la precipitación de los metales remanentes en solución, distribuyéndose en halos marginales ó por debajo de la zona de formación de las aguas ácidas y sulfatadas (subeconómico).

4.8.3. Esbozo del Modelo Hipotético de Construcción de la Diatrema Pucamarca

La evolución geológica de Pucamarca, está genéticamente relacionada a dos tipos de eventos magmáticos, el primero de naturaleza volcánica con la deposición de aglomerados, tobas, flujos de lavas andesíticas, volcanismo fisural y central en rocas

postcretáceas que pertenecen a la Formación Huilacollo. El segundo tipo intrusivo se da con emplazamientos sucesivos de cuerpos mayores de diorita-granodiorita (geología regional), seguida de pequeños cuerpos de pórfido andesítico y pórfido de cuarzo (no datados).

Posteriormente se tiene el desarrollo de la diatrema en facies multicíclicas terminando con la fase hidrotermal que depositó la mineralización de oro y plata. Finalmente se tiene la erosión y deposición de la morrena adyacente, además del proceso de oxidación del sistema hidrotermal (figs. 31, 32, 33 y 34).

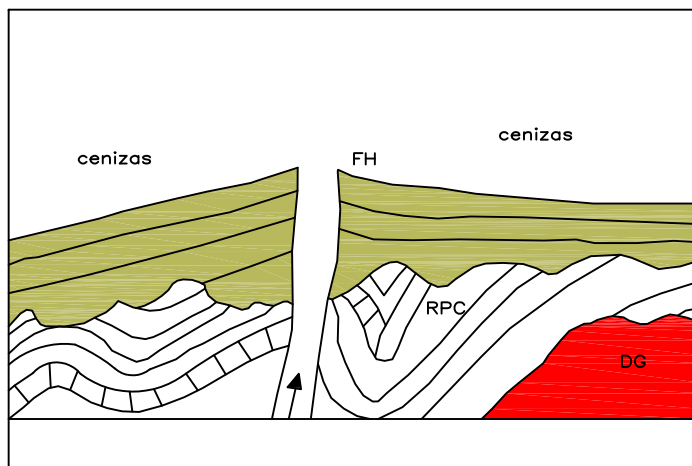
4.8.4. Comparación de las Mineralizaciones de Pucamarca con otros Yacimientos Auríferos Similares en el Perú y el Mundo

Si bien no se tienen estudios profundos en el yacimiento aurífero epitermal de alta sulfuración de Pucamarca, se seleccionaron datos de diferentes depósitos similares existentes entre otros en el Perú y el mundo, información importante para un ensayo comparativo.

La relación estructural, litología, control tectónico, alteración y ensamble mineralógico de yacimientos peruanos como el de Pucamarca, Quicay y Marcapunta pueden ser comparados con otros yacimientos existentes en el mundo como es el caso de Kelian Gold Mine en Indonesia y Rosia Montana en Rumanía (tabla 3 y figs. 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, y 44).

4.8.4.1. Rasgos Geológicos del Yacimiento Epitermal de Quicay.

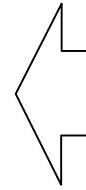
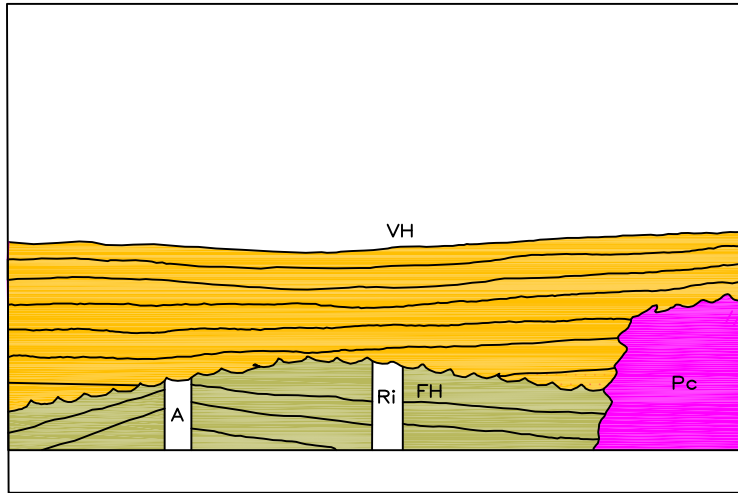
Este yacimiento se encuentra ubicado a 20 km al SW de la ciudad de Cerro de Pasco, emplazado en la Cordillera Central a una altura de 4300 msnm.



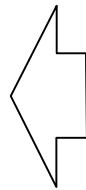
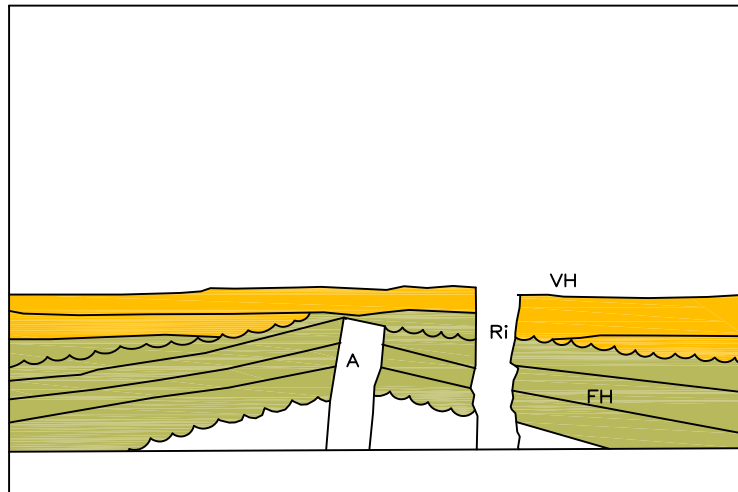
OLIGOCENO_MEDIO_(28_MA)
 VOLCANISMO SUB AÉREO - FORMACIÓN
HUILACOLLO - AGLOMERADOS, TOBAS,
 FLUJOS DE LAVAS ANDESÍTICAS,
 VOLCANISMO FISURAL Y CENTRAL EN
 ROCAS PRE - CRETÁCEAS
 (SEDIMENTARIAS E INTRUSIVAS) SKARNS
 A L S W D E P A L C A .

DPOx Diatrema Pucamarca en oxidación.
 T Tufisita
 Bf Brecha fragmental.
 DP Diatrema Pucamarca.
 Pc Pórfido de cuarzo.
 Pa Pórfido andesítico.
 VH Volcánicos Huaylillas.
 Ri Riolita.
 FH Formación Huilacollo.
 A Andesita.
 DG Diorita - Granodiorita.
 RPC Rocas pre-cretácicas.

Fig. 31



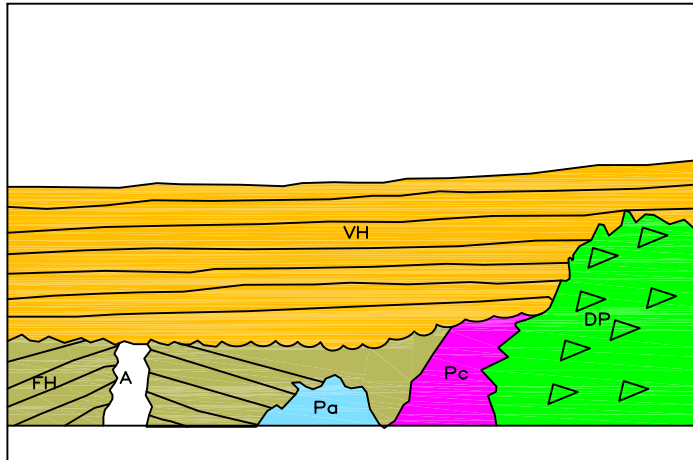
MIOCENO MEDIO – SUPERIOR (12–8 MA ?)
INTRUSION DE PÓRFIDO DE CUARZO,
FUERTE BRECHAMIENTO, DIGESTIÓN DE
ROCA CAJA, CUARZO LIBRE. EN
PROFUNDIDAD BRECHA MONOMÍCTICA,
FRAGMENTOS SUBREDONDEADOS
(PEBBLEDIKE). SILIFICACIÓN DEL PÓRFIDO Y
ROCA – CAJA. INTRUSIÓN EN FORMA DE
NARIZ EN C° CHECOCOLLO.



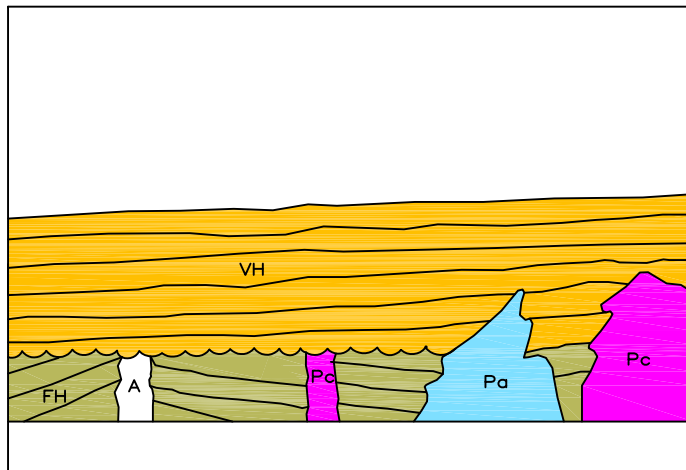
MIOCENO INFERIOR (24–18 MA)
VOLCANISMO SUB – AÉREO ÁCIDO
VOLCÁNICO HUAYLILLAS – TOBAS CLARAS,
ROSADAS, CUARZO LIBRE, MICAS CLASTOS
DE PIEDRA PÓMEZ.

DPOx Diatrema Pucamarca en oxidación.
T Tufisita
Bf Brecha fragmental.
DP Diatrema Pucamarca.
Pc Pórfido de cuarzo.
Pa Pórfido andesítico.
VH Volcánicos Huaylillas.
Ri Riolita.
FH Formación Huilacollo.
A Andesita.
DG Diorita – Granodiorita.
RPC Rocas pre-cretácicas.

Fig. 32



DESARROLLO DE ESTRUCTURAS TIPO DIATREMA EN LA NARIZ NW DEL PÓRFIDO DE CUARZO DIGESTIÓN DE ROCA TECHO Y TRANSPORTE DESDE NIVELES PROFUNDOS. BRECHA POLOMÍCTICA, NARIZ BLANCO – HUESO DE ASPECTO TUFÁCEO. BRECHA FRAGMENTAL EN LAS CAJAS (HUILACOLLO Ó SILIFICACIÓN MODERADA. (BRECHAS NO AFLORANTES)

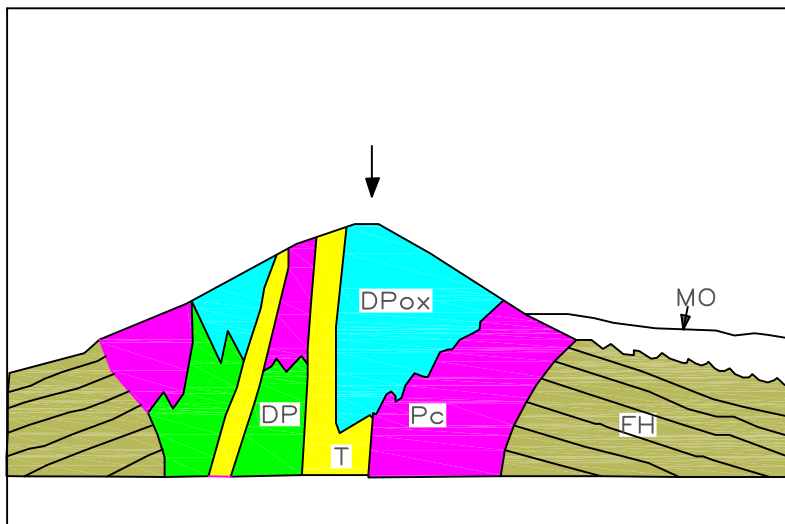


MIOCENO MEDIO – SUPERIOR (12–8 MA?)
INTRUSIÓN DE PÓRFIDO ANDESÍTICO EN C° CALDERO. CONTEMPORÁNEO CON EL PÓRFIDO DE CUARZO DEL C° CHECOCOLLO INCLUSO PUEDE SER MAS ANTIGUO. DISEMINACIÓN DE Py–Cc–Bn–Cv y Cpy EN FACIES ARGÍLICAS.

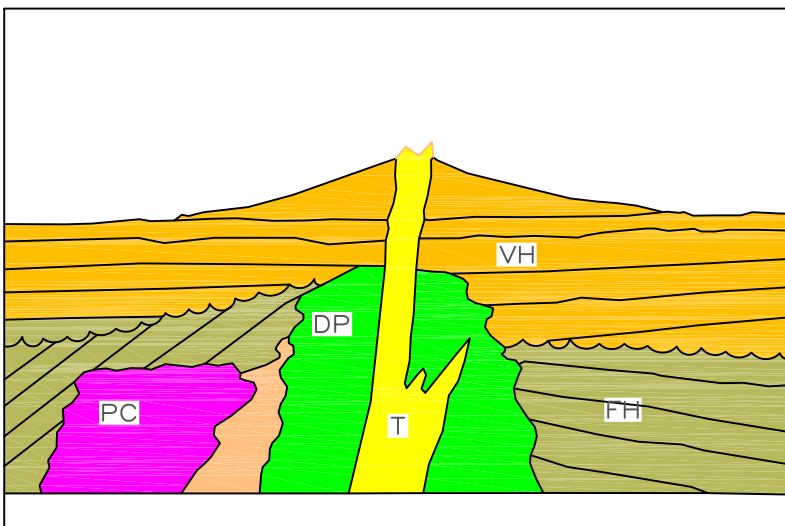
DPox Diatrema Pucamarca en oxidación.
T Tufisita
Bf Brecha fragmental.
DP Diatrema Pucamarca.
Pc Pórfido de cuarzo.
Pa Pórfido andesítico.
VH Volcánicos Huaylillas.
Ri Riolita.
FH Formación Huilacollo.
A Andesita.
DG Diorita – Granodiorita.
RPC Rocas pre–cretásicas.

Fig. 33

EVENTOS GEOLÓGICOS EN PUCAMARCA (TERCIARIO – RECIENTE)



PLEISTOCENO – RECIENTE – EROSIÓN Y DEPOSICIÓN POR ACCIÓN GLACIAR DE LA MORRENA DE LA LADERA NORTE. OXIDACIÓN DEL SISTEMA HIDROTHERMAL.



VOLCANISMO ÁCIDO, FUERTEMENTE EXPLOSIVO. EMISIÓN DE GASES Y ROCA MUY FINA, TUFOS SILÍCEOS – TUFISITAS COMO CUERPOS IRREGULARES PERO TAMBIÉN DIQUES. ROCA BLANCA SUAVE. PALEO SUPERFICIE A 400 – 500 MTS. DE SUPERFICIE ACTUAL. MINERALIZACIÓN DE ORO-PLATA EN FASE TERMINAL.

DPox Diatrema Pucamarca en oxidación.
T Tufisita
Bf Brecha fragmental.
DP Diatrema Pucamarca.
Pc Pórfido de cuarzo.
Pa Pórfido andesítico.
VH Volcánicos Huaylillas.
Ri Riolita.
FH Formación Huilacollo.
A Andesita.
DG Diorita – Granodiorita.
RPC Rocas pre-cretácicas.

Fig. 34

Regionalmente afloran rocas sedimentarias del Paleozoico y Mesozoico conocidas como las Formaciones y Grupos Excelsior, Mitu, Pucará, Condorsinga, Goyllarizquizga, Jumasha y Calera. La actividad ígnea se presenta como stocks, domos, diatremas y chimeneas volcánicas, derrames; con rocas intrusivas de composición granodiorítica, cuarzo monzonita, diorita y riodacita; las rocas volcánicas son andesitas, dacitas, aglomerados y tufos. El emplazamiento de los intrusivos y estructuras volcánicas obedece a la intersección de fallas de rumbo N 20° a 50° W y buzamiento 85° NE, y fallas de rumbo N 50° a 60° E y buzamiento 85° NW; aunque regionalmente destaca el control del fallamiento Norte-Sur importante en la ubicación de la diatrema de Cerro de Pasco.

El yacimiento está emplazado en una estructura volcánica tipo diatrema que probablemente se inició con una primera fase piroclástica; luego se produjo el emplazamiento de las lavas de composición andesíticas y dacíticas; la etapa final sería la inyección de rocas intrusivas dioríticas y del pórfido monzodiorítico cuarcífero. Localmente las rocas ígneas cubren el basamento sedimentario.

Quicay presenta las siguientes características de los depósitos del tipo ácido sulfato:

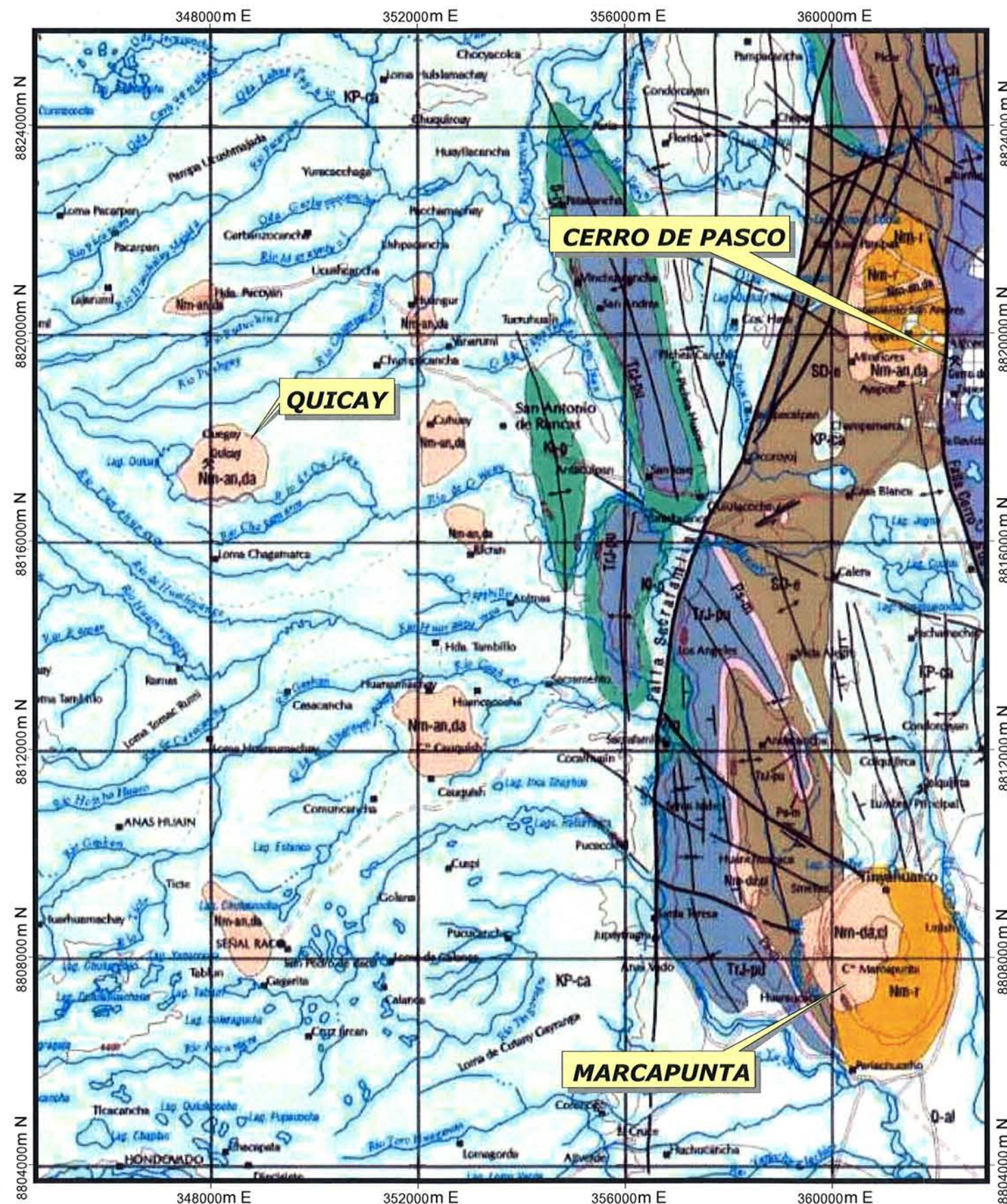
- a) Una zona central de alteración argílica avanzada (cuarzo-alunita, 6.8 Ma) que grada a sericita-cuarzo-argilita, y en la zona exterior la alteración propílica.
- b) Mineralización de Au-Ag-Cu (covelita). Es probable a mayor profundidad la presencia de enargita-luzonita.
- c) Asociación con un vulcanismo calcoalcalino.

La mineralización de oro está asociada a la zona de alteración argílica avanzada, los más altos valores se presentan en los cuerpos de sílice, en brechas silíceas y también con los óxidos de hierro como hematita, limonita y jarosita. La baritina se presenta en los

afloramientos de sílice. Se estima un potencial de 500,000 onzas de oro (tomado de Alvarez Calderón, Ángel. 1996). (figs.35, 36 y 37).

4.8.4.2. Rasgos Geológicos del Yacimiento Epitermal de Marcapunta. El depósito de Marcapunta se encuentra ubicado a 10 km. al sur de la ciudad de Cerro de Pasco. La secuencia estratigráfica regional está conformada por las capas rojas del Grupo Mitu de edad Permotriásica seguida por calizas y dolomías del Grupo Pucará de edad triásica a jurásica; las que a su vez son seguidas por brechas de carbonatos y conglomerados de la Formación Calera del Eoceno. Estas unidades fueron intruídas y a la vez recubiertas durante el Mioceno por domos dacíticos (12.9 Ma) y piroclásticos eruptivos del centro volcánico de Marcapunta. La falla longitudinal de dirección N-S, controló el emplazamiento de los volcánicos miocénicos de Cerro de Pasco y Marcapunta (Vidal, César y Ligarda, Rolando. 2004). (fig. 38).

El depósito de Au-Ag-Cu grada de una zona central de Au-Ag-Cu hacia otra zona periférica de Zn-Pb-Ag tanto al norte como al sur (Colquijirca y San Gregorio). El centro volcánico que recubre la mineralización de cobre-oro, está intensamente alterado, los ensambles de alteración hidrotermal varían hacia fuera desde una zona central de cuarzo-pirita-alunita (10.8 Ma), dickita-illita-caolinita-montmorillonita hacia halos externos de clorita-calcita. La mineralización de oro, plata y cobre, está emplazada en niveles subvolcánicos y circunda la diatrema, estando a su vez recubierta por los domos dacíticos del volcán Marcapunta. Estos cuerpos mineralizados que alcanzan espesores de hasta 100 metros cerca de la diatrema, adelgazan lateralmente a cuerpos estratiformes de reemplazamiento metasomático en horizontes calcáreos. La mena predominante es enargita con trazas de covelita, oro nativo y telururos. Calcosita y digenita hipógenas se presentan en un manto profundo por debajo de las zonas con enargita.

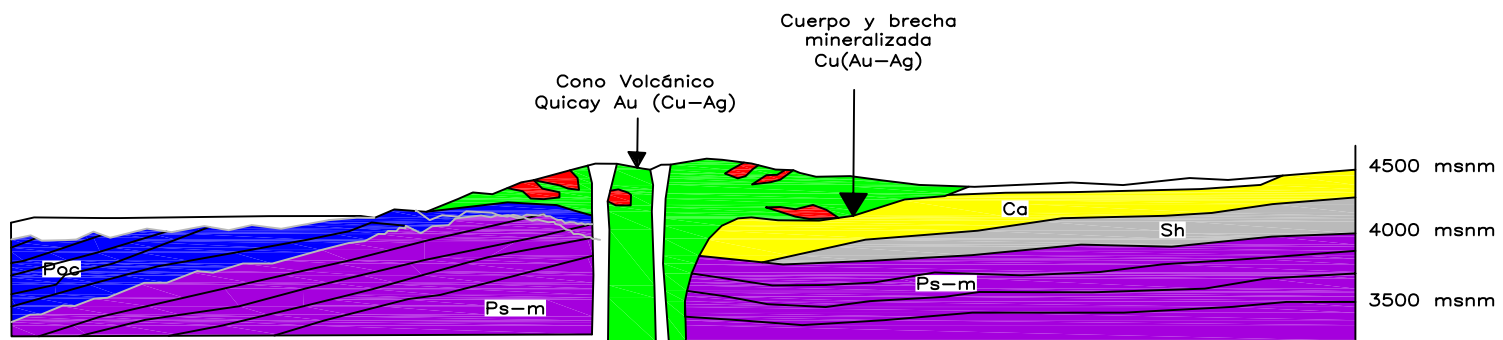


ERATEMA	SISTEMA	SERIE	UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS	RODAS INTRUSIVAS	
				PLUTONICAS	MEGACALAS
GENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno	Dep. Aluviales	Q-al	
			Dep. en Bolsones	Q-bo	
			Dep. Fluvio-glaciales	Q-lg	
			Dep. Moriscos	Q-mo	
	NEOGENO	Plioceno	Fm. Huayllay	Np-h	
		Mioceno	Volcanes Rumbura	Nm-r	
		Mioceno	Volcanes Cutqui	Nm-vc	
	PALEOGENO	Oligoceno			
		Paleoceno			
MESOZOICO	CRETACEO	Superior	Fm. Casapeta	KP-ca	
			Fm. Jumbilla	Ks-i	
			Fm. Paratambo	Ps-ol	
		Inferior	Fm. Chobli	Ks-ch	
			Gpo. Goyllactuzpe	Ks-g	
	JURASICO	Inferior	Fm. Condorhuasi	J-c	
			Fm. Almacay	J-a	
			Fm. Chumbi	J-ch	
	TRIASICO	Superior	Gpo. Mito	Ps-m	
PALEOZOICO	PERMIANO	Superior	Gpo. Tarma - Copacabana	CP-c	
	CARBONIFERO	Medio	Gpo. Ando	D-a	
	DEVONICO	Superior	Gpo. Escorial	SD-a	
	NEO PROTEROZOICO		Esquistos	Pe-cm	

PLANO GEOLÓGICO REGIONAL YACIMIENTO EPITERMAL QUICAY

Escala 1/100,000

Fig.
35



LEYENDA

	Cuaternario fluvio aluvial
	Piroclásticos
	Lavas andesita-dacíticas
	Miembro Calera
	Conglomerado shuco
	Pucará occidental
	Mitu
	Cuello volcánico
	Cuerpo mineralizado
	Discordancia angular

SECCIÓN IDEALIZADA E-W (Quicay)

(Tomado de FLORES
BARRÓN Ronald E. 2001)

Fig.

37

Este yacimiento ha sido catalogado como de alta sulfuración y extraoficialmente se le estima un potencial de 500,000 onzas de oro (Comunicación verbal de César Vidal.2008).

4.8.4.3. Rasgos Geológicos del Yacimiento Epitermal de Kelian

Gold Mine. Este depósito se encuentra ubicado en la región de Kalimantan en Indonesia en la isla de Borneo. Previo al brechamiento, intrusiones andesíticas (19.7 Ma) se emplazaron dentro de un paquete de volcánicos félsicos, areniscas y lodos carbonatados (Terciarios), teniendo como basamento rocas Triásico-Cretácicas, dando inicio al establecimiento de un sistema geotermal mineralizante, que fue acompañado de intrusiones riolíticas (19.8 Ma) que definieron la diatrema (complejo maar-diatrema), con presencia de abundantes brechas hidrotermales. Este centro volcánico se ubica dentro de un sistema de fallamiento regional de rumbo noreste (Falla Adang), intersectado por otro sistema regional de fallamiento nornoreste.

El brechamiento y la mineralización ocurren sincronizadamente después del emplazamiento de las riolitas. Davies (2002,2003 y 2008) identificó cinco fases de mineralización en vetas y disseminaciones que varían de pirita a metales base (esfalerita, galena y calcopirita), finalizando con sulfosales (proustita, pirargirita y tenantita-tetrahedrita). La deposición de los minerales de ganga progresó de illita-cuarzo a adularia y/o cuarzo, finalizando con ensambles carbonatados. La deposición del oro ocurrió desde la primera a la cuarta fase y se presenta como inclusiones dentro de la pirita, esfalerita, galena, arsenopirita, cuarzo y sulfosales.

La alteración en el entorno de las andesitas grada desde una zona proximal de cuarzo-illita-pirita ó illita-carbonato-pirita a una zona distal de clorita-calcita-illita. La alteración en los volcanoclásticos grada de una zona proximal de cuarzo-illita-pirita a una zona distal de esmectita-illita. Eventualmente se encuentran adularia-cuarzo-illita ó carbonatos

y adularia, dependiendo ésta de variantes en la litología, estructura y permeabilidad.

Éste yacimiento según Camprubí y Albinson.2006, fue catalogado como de sulfuración intermedia y se estima que tenga unas 8.0 millones de onzas de oro (Davies, Andrew G.S.; Cooke, David R; Gemmel, J. Bruce.2008). (figs. 39 y 40).

4.8.4.4. Rasgos Geológicos del Yacimiento Epitermal de Rosia Montana. Éste yacimiento se ubica en el sector oeste del país de Rumanía en Europa del Este. El basamento está conformado por rocas pre-cambrianas, paleozoicas y cretácicas, cortadas por una falla regional de rumbo noroeste, que al intersectarse con otro sistema noreste, definió un corredor suroeste-noreste que incluye otros yacimientos mineralizados. Las intrusiones son descritas como dacitas porfíricas (13.6 Ma), cuyo emplazamiento definió la formación de una diatrema, asociada a brechas freato-magmáticas (maar-diatrema).

La alteración hidrotermal es pervasiva distinguiendo cuatro tipos; clorita-calcita, adularia; alteración filica y silicificación. La mineralización de oro y plata está íntimamente asociada con el fracturamiento freato-magmático, apareciendo en venas que cortan la dacita masiva y también como disseminaciones en las rocas alteradas. Ésta mineralización (12.8 Ma) incluye sulfuros como pirita, marcasita, esfalerita, galena, calcopirita, arsenopirita, tenantita- tetrahedrita, telururos y sulfotelururos, hematita y electrum. La ganga consiste de abundante cuarzo y carbonatos, sericita, adularia y rodonita.Éste yacimiento epitermal que tendría unos 10.0 millones de onzas de oro, ha sido clasificado como de sulfuración intermedia (Wallier, Stefan; Rey, Roger; Kouzmanov, Kalin; Pettke, Thomas.2006).(figs. 41, 42, 43 y 44).

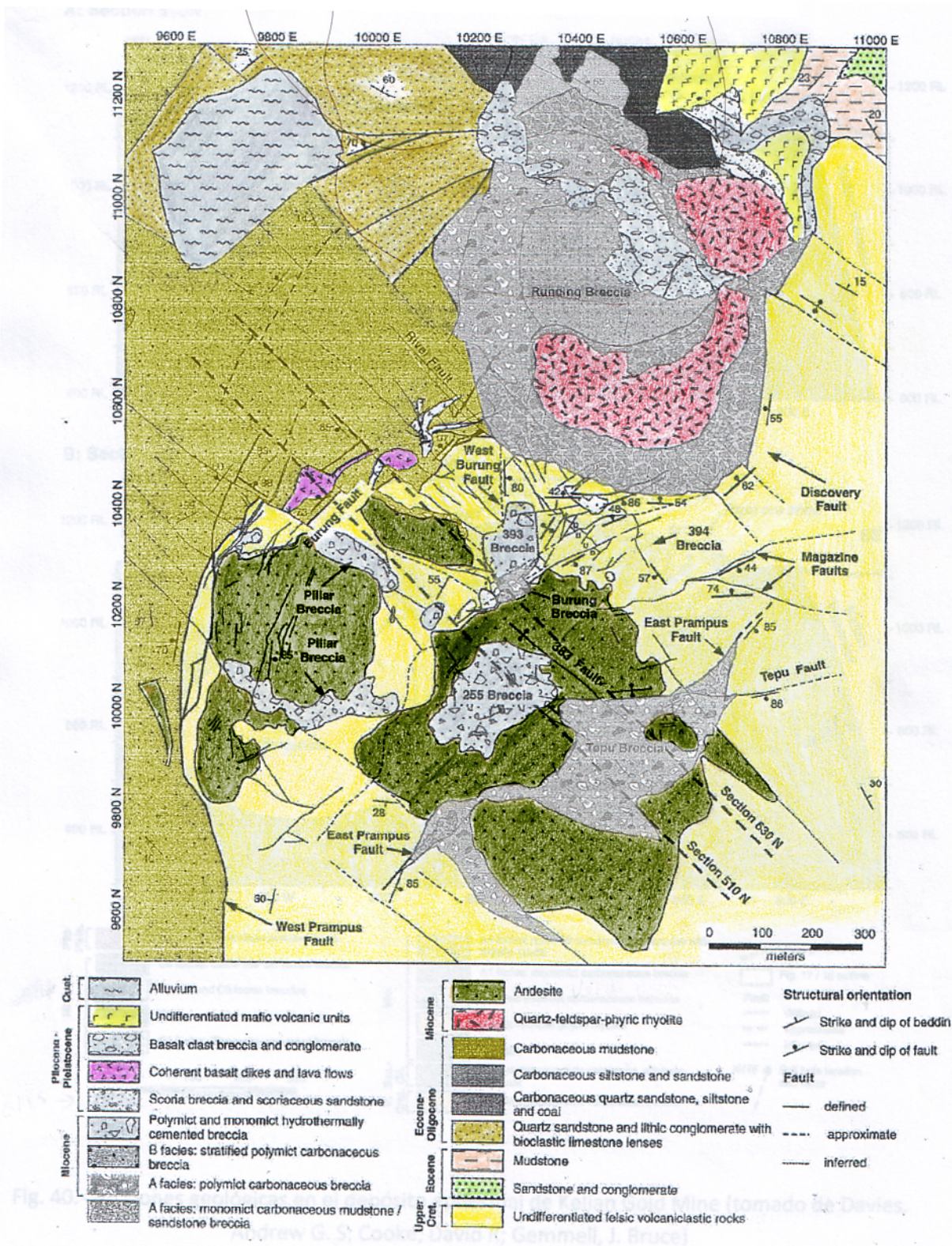
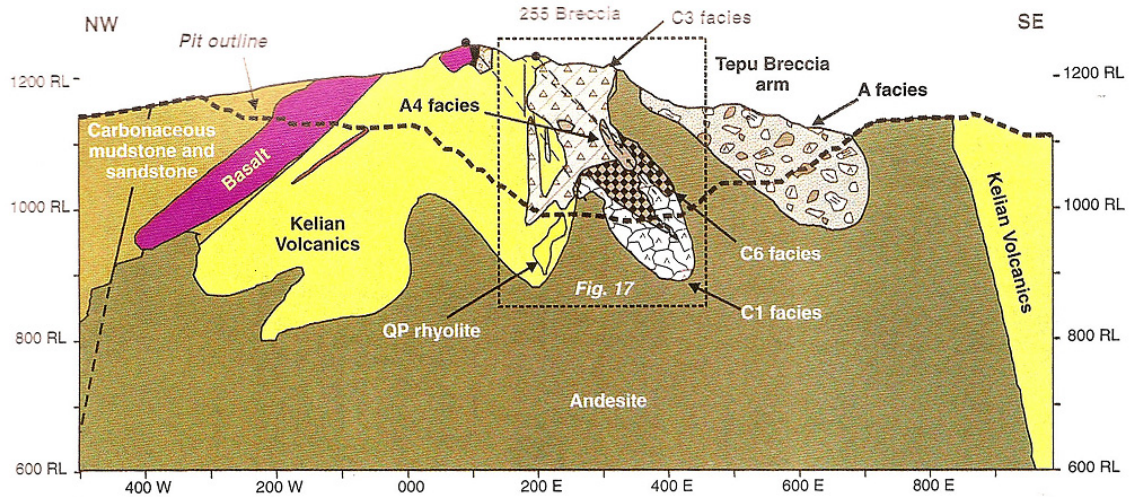


Fig. 39.- Mapa geológico del depósito epitermal de Kelian Gold, Mine Kallimantan, Indonesia.
(Tomado de Davies, Andrew G.S; Cooke, David R; Gemmell, J. Bruce).

A: Section 510N



B: Section 630N

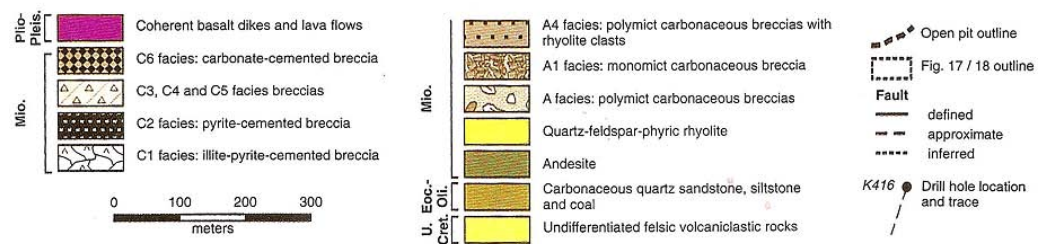
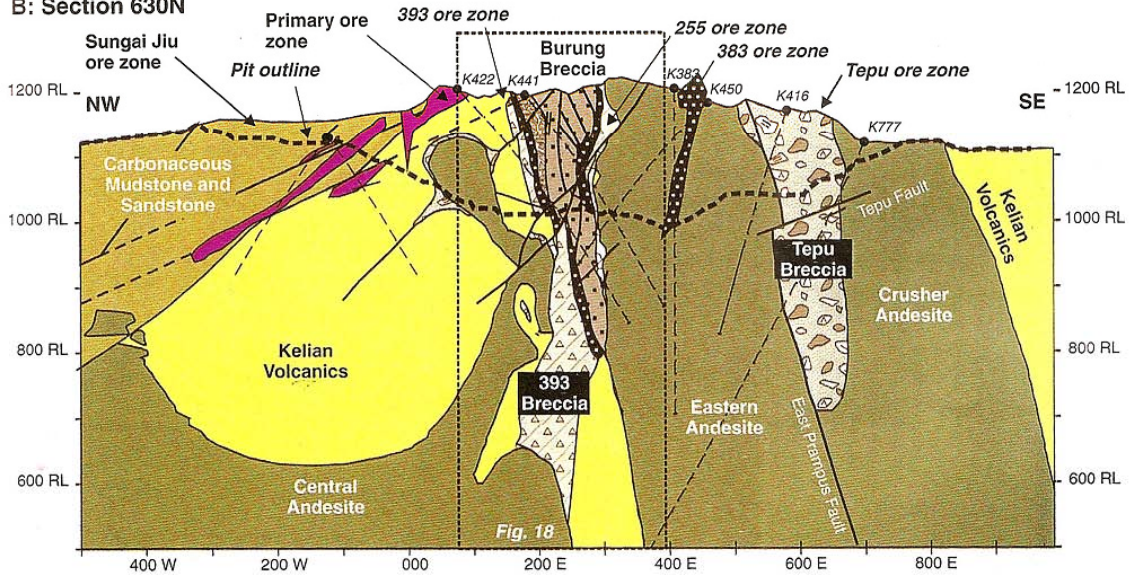


Fig. 40.- Secciones geológicas en el depósito epitermal de Kelian Gold Mine (tomado de Davies, Andrew G. S; Cooke; David R; Gemmell, J. Bruce)

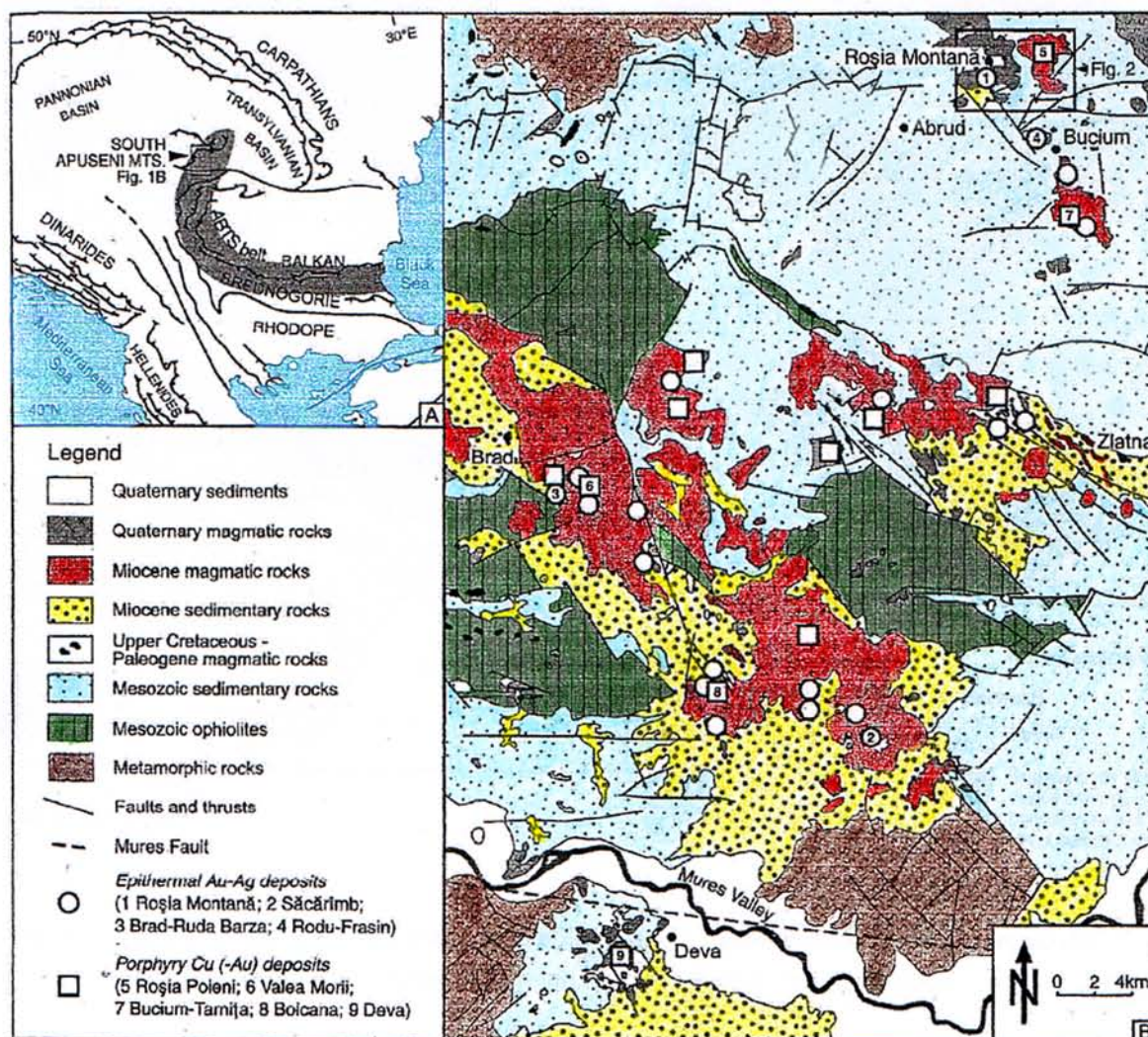


Fig. 41.- Mapa esquemático de la zona del suroeste europeo. Ver depósitos minerales asociados (Rosia Montana) (tomado de Wallier, Stefan; Rey, Roger; Kouzmanov, Kalin; Pettke, Thomas. 2006

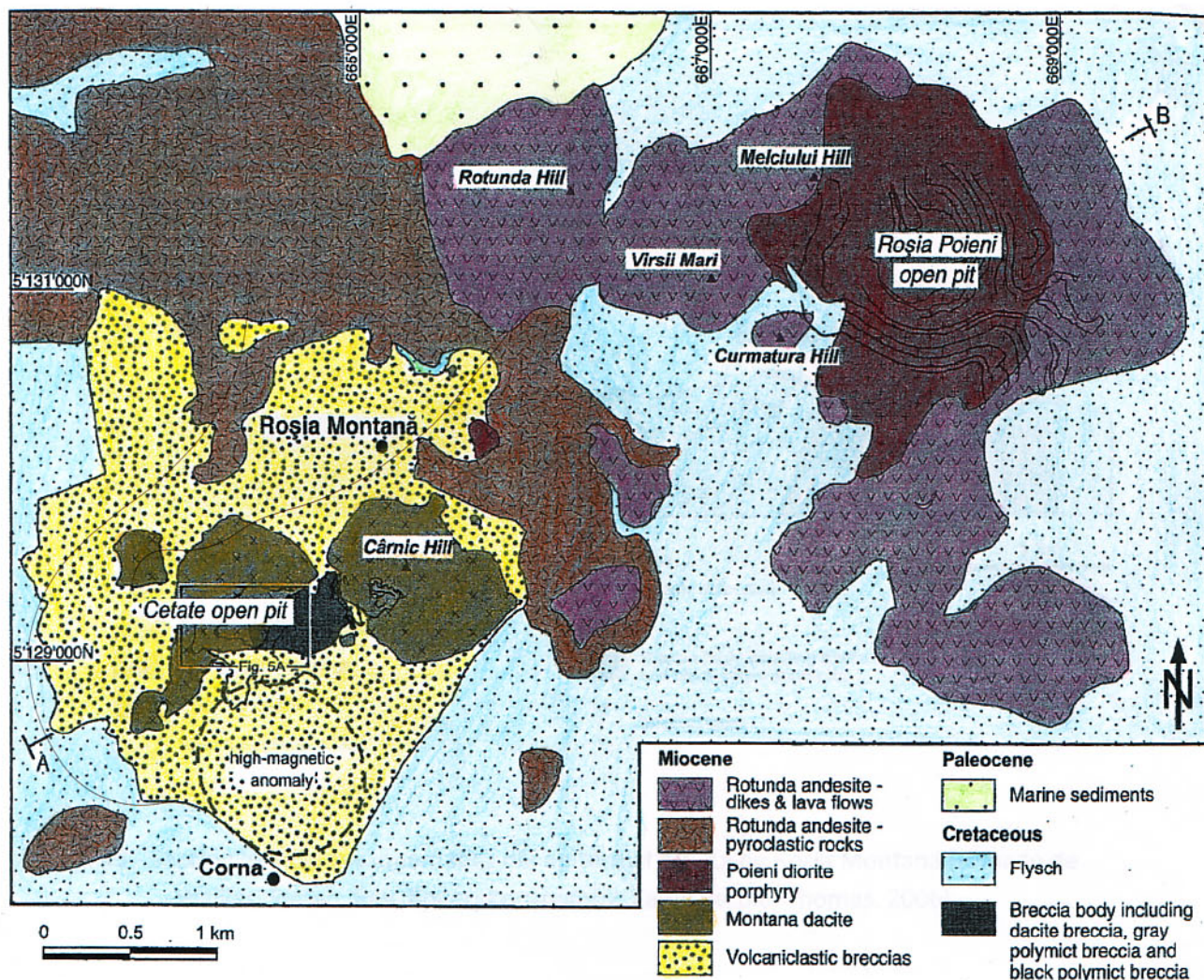


Fig. 42.- Mapa geológico próximo al depósito epitermal Au-Ag de Rosia Montana (tomado de Wallier, Stefan; Rey, Roger; Kouzmanov, Kalin; Pettke, Thomas.2006).

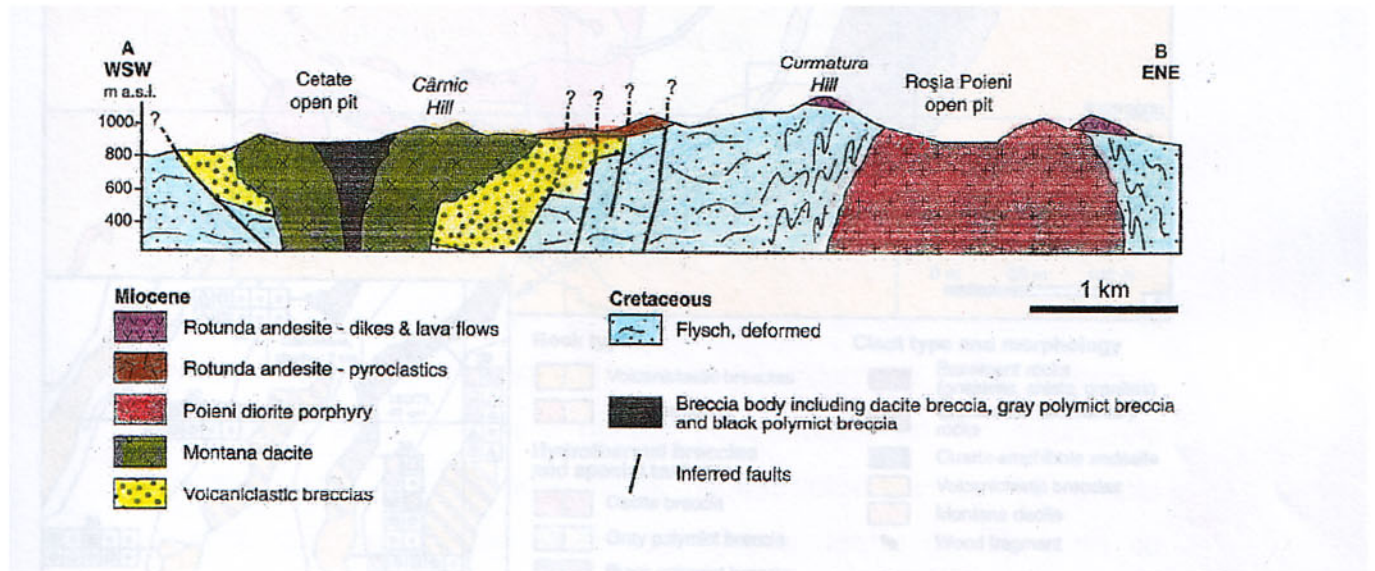


Fig.43.- Sección geológica esquemática del epitermal Au-Ag de Rosia Montana (tomado de Wallier, Stefan; Rey, Roger; Kouzmanov, Kalin; Pettken, Thomas.2006).

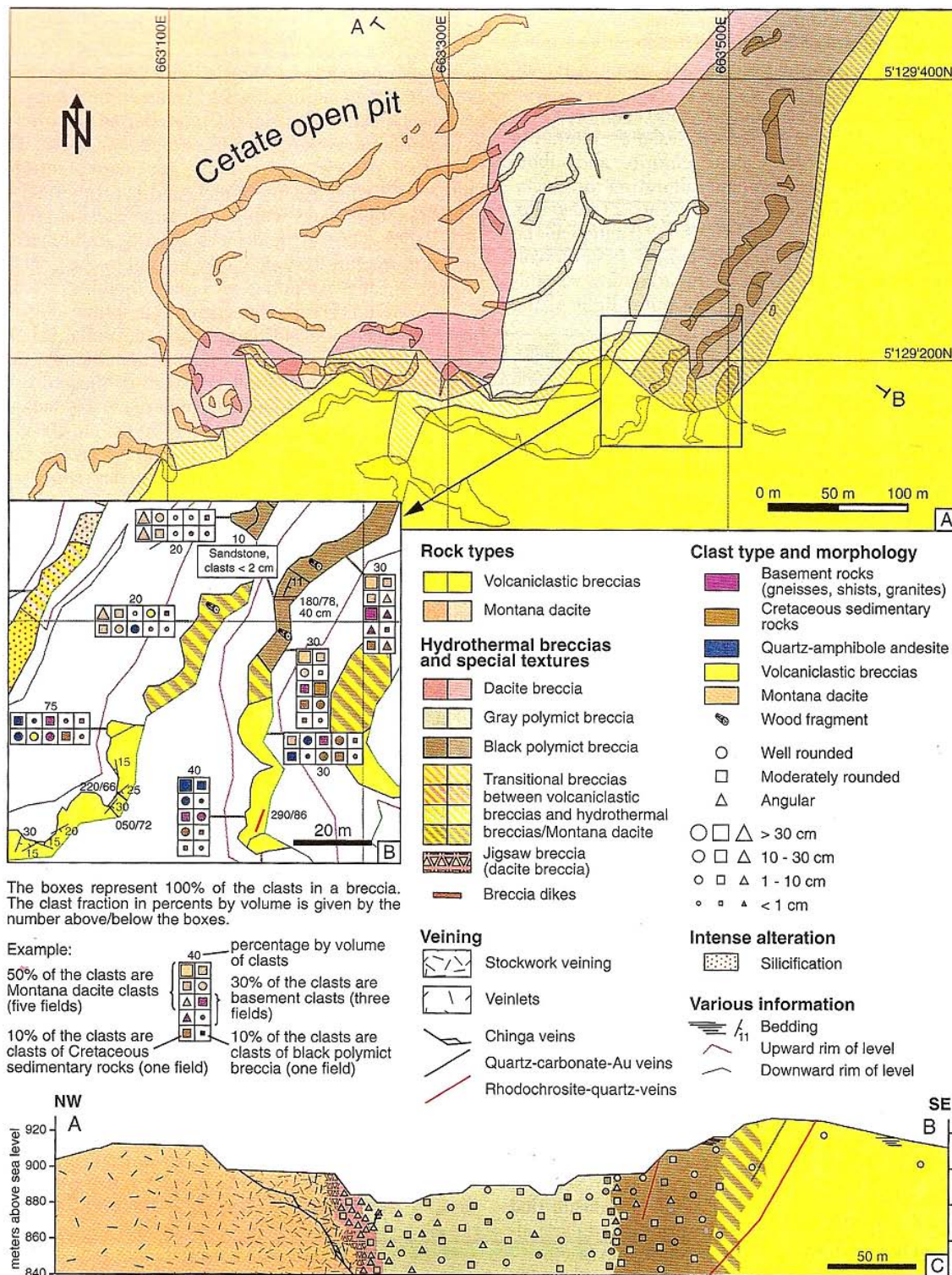


Fig. 44.- Mapa geológico generalizado del tajo abierto de Cetate, en el epitermal Au-Ag de Rosia Montana (tomado de Wallier, Stefan; Rey, Roger; Kouzmanov, Kalin; Pettke, Thomas. 2006).

4.8.4.5. Relación Estructural (Geometría). Indudablemente que en los cinco yacimientos comparados la mineralización ha sido en todos los casos relacionada a la presencia de una diatrema, pero la mineralización no está estrictamente depositada en la diatrema, sino que en casos como el de Marcapunta la mineralización se encuentra ubicada en el entorno y en la diatrema, obedeciendo posiblemente a rasgos geoquímicos en las soluciones mineralizantes y a características litoestructurales de la propia diatrema, que permitió la deposición mineral dentro de ella y en su entorno. Sin embargo en el caso de Pucamarca, Quicay, Kelian Gold Mine y Rosia Montana, la mineralización no se presenta en toda la diatrema, sino que parece obedecer a controles litoestructurales (Tabla 5).

4.8.4.6. Litología. Las diatremas en su mayoría están desarrolladas en rocas Terciarias como son andesitas, brechas volcánicas, tobas ignimbríticas, riolitas y dacitas, todas ellas asociadas a la diatrema; pero en los fragmentos observados en las brechas se reconoció la presencia de sedimentos clásticos y carbonatados de edad Jurásica-Cretásica y posiblemente Paleozoicos y Proterozoicos provenientes del posible basamento existente a más de 2000 metros de profundidad. Los yacimientos de Marcapunta y Rosia Montana de alta sulfuración y sulfuración intermedia respectivamente, presentan su mineralización en un ambiente dominado por rocas sedimentarias afectadas por procesos volcánicos, demostrando así que estos yacimientos se pueden dar en distintos ambientes geológicos (Tabla 5).

4.8.4.7. Control Tectónico. En todos los casos las diatremas están asociadas a estructuras de origen volcánico, en especial complejos andesíticos y dacíticos y posiblemente calderas. Así mismo existe un importante control de éste tipo de depósitos por parte de fallas de escala regional en zonas de intensa fracturación tensional. Dichas

fallas determinan la localización de depósitos y actúan como guía para el emplazamiento de la fuente de calor magmático necesaria para la subsiguiente actividad hidrotermal, que controla la duración de dicha actividad. Pero, aunque las fallas de orden mayor ejercen un control directo sobre el emplazamiento de la mineralización, se ha observado que ésta suele disponerse de forma preferencial en fallas subsidiarias (Tabla 5).

4.8.4.8. Alteraciones Hidrotermales. La alteración hidrotermal es variable entre la fuertemente ácida del epitermal de alta sulfuración (Pucamarca, Quicay y Marcapunta) y la alcalina incrementada en el epitermal de sulfuración intermedia (Kelian Gold Mine y Rosia Montana) (Tabla 5).

4.8.4.9. Mineralogía. En los metales económicos se observa cierta similitud mineralógica como es el caso de la esfalerita, galena, calcopirita, tenantita - tetrahedrita, y oro nativo; no sucediendo lo mismo con la ganga que es más contrastante sobre todo con la presencia de carbonatos y adularia en los yacimientos de Kelian Gold Mine y Rosia Montana que son de sulfuración intermedia.

Otro detalle importante respecto a la mineralización en Pucamarca es la ausencia de enargita-tennantita-tetrahedrita (Tabla 5).

4.8.5. Discusión

La litología intrusiva relacionada a vulcanismo, el control tectónico, la geoquímica de los fluidos, son los principales controles sobre manifestaciones auríferas en diatremas ubicadas en márgenes de subducción activa.

TABLA 5
RASGOS GEOLÓGICOS IMPORTANTES DE LOS YACIMIENTOS EPITERMALES QUICAY, MARCAPUNTA , KELIAN GOLD
MINE Y ROSIA MONTANA COMPARADOS CON LOS DE PUCAMARCA.

YACIMIENTO	RELACIÓN ESTRUCTURAL (GEOMETRÍA)	LITOLOGÍA		CONTROL TECTÓNICO	ALTERACIONES, ENSAMBLE MINERALÓGICO	MINERALOGÍA ASOCIADA		TIPO DE YACIMIENTO EPITERMAL
		INTRUSIVA	INTRUÍDA			MENA	GANGA	
PUCAMARCA, TACNA PERÚ	Diatrema mineralizada	Pórfido de cuarzo – pórfido andesítico 8-12 Ma	Volcánicos Huilacollo – derrames y piroclásticos andesíticos y dacíticos	FALLA REGIONAL (INCAPUQUIO) NW-SE	Silicificación intensa,(porosa y masiva) Argílica avanzada (sílice – alunita). arcilla y caolinita Propílica (clorita, pirita y calcita) 6.8 Ma Alunita	Au – Ag – Cu (calcocita, bornita-covelita, electrum.)	Pirita, oropimente, regalgar, cinabrio, asufre nativo, hematita.	EPITERMAL DE ALTA SULFURACIÓN 800,000 ONZAS DE ORO APROXIMADAMENTE
QUICAY, CERRO DE PASCO PERÚ	Diatrema mineralizada	Dacita (11.5 Ma) Pórfido monzodiorítico cuarcífero	Brechas hidrotermales síliceas y andesíticas asociadas a la diatrema – calizas Pucará y areniscas Goyllar	FALLA REGIONAL (LONGITUDINAL) N-S	Argilica avanzada (cuarzo-alunita)-Sericita-cuarzo-argílica Propílica	Au – Ag – Cu (covelita) Pirita, enargita, calcopirita tenantita-tetrahedrita y telururos	Alunita, limonita, jarosita, baritina, caolinita, pirofillita.	EPITERMAL DE ALTA SULFURACIÓN 500,000 ONZAS DE ORO APROXIMADAMENTE
MARCAPUNTA, CERRO DE PASCO PERÚ	Diatrema con mineralización periférica	Domos dacíticos 12,9 Ma	Sedimentos clásticos calcáreos triásicos y piroclásticos eruptivos eocénicos asociados a la diatrema	FALLA REGIONAL (LONGITUDINAL) N-S	Argilica avanzada (cuarzo, alunita). Argílico (dickita, illita , caolinita, montmorillonita). Propílica (clorita calcita) 10.8 Ma (alunita)	Au – Ag – Cu (enargita , covelita, oro nativo , telururos) (calcocita y digenita hipógenos.)	Cuarzo-pirita	EPITERMAL DE ALTA SULFURACIÓN CON ENARGITA ORO Y REEMPLAZAMIENTO METASOMÁTICO MANTIFORME 500,000 ONZAS DE ORO APROXIMADAMENTE
KELIAN GOLD MINE, INDONESIA	Diatrema mineralizada	Riolitas 19.8 Ma	Volcanoclásticos félsicos ,areniscas y lodos calcáreos Terciarios) asociados a la diatrema	FALLA REGIONAL NW-SE	Cuarzo-illita-pirita Adularia-cuarzo-illita Esmectita-illita	Au Pirita, esfalerita, galena, calcopirita, proustita, pirargirita, tenantita-tetrahedrita	Illita-cuarzo Adularia-cuarzo Carbonatos	EPITERMAL DE SULFURACIÓN INTERMEDIA 8.0 MILLONES ONZAS DE ORO APROXIMADAMENTE
ROSLIA MONTANA RUMANIA	Diatrema mineralizada	Dacita 13.6 Ma.	Brechas volcaniclásticas asociadas a la diatrema (terciarias) , y areniscas y arcillas cretácicas .	FALLA REGIONAL	Clorita- calcita Adularia Cuarzo – pirita –sericita Sílice Caolinita - illita	Au – Ag Pirita , marcasita, esfalerita , galena , calcopirita, arsenopirita, tennantita, tetrahedrita , telururos, sulfotelururos, hematita, electrum. 12.85 Ma	Cuarzo, carbonato, rodonita, sericita y adularia.	EPITERMAL DE SULFURACIÓN INTERMEDIA 10.0 MILLONES ONZAS DE ORO APROXIMADAMENTE

4.8.5.1. La Litología Intrusiva relacionada a Vulcanismo. La mayoría de los depósitos epitermales conocidos hoy en día están situados alrededor del margen Circun-Pacífico, asociados al termalismo tardío de los sistemas volcánicos operantes en dicho margen desde el Terciario (Camprubí, Antoni y Albinson, Tawn. 2006).

En su totalidad los depósitos epitermales están asociados directamente a márgenes de subducción activos, en donde es frecuente la presencia de vulcanismo sub-aéreo, de carácter ácido a intermedio.

4.8.5.2. El Control Tectónico. Existe un importante control de éste tipo de depósitos por parte de fallas de escala regional en zonas de intensa fracturación tensional, preferencialmente en fallas subsidiarias, que desarrolla a su vez la permeabilidad necesaria contemporáneamente al hidrotermalismo.

4.8.5.3. La Geoquímica de los Fluidos. Las características químicas y el contenido total en gas de los fluidos mineralizantes, que son los factores determinantes en su reactividad; en su capacidad para el transporte de metales y en la paragénesis mineral, tanto por lo que respecta a la alteración del encajonante como para la mineralización en sí, contando para ello con condiciones de presión y temperatura.

CAPITULO 5

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Resultados y Discusión en Función del Objetivo General

La ubicación regional de Pucamarca, sus características como yacimiento, permitió realizar un intento comparativo con otros yacimientos en el Perú y el mundo, destacando su relación con diatremas e intrusiones ácidas pero no necesariamente la misma alteración y mineralogía de mena y de ganga temporal y espacialmente. Otro detalle importante es que el contexto geológico para el Perú ha sido estudiado principalmente en rocas volcánicas pero faltaría profundizar el contexto en rocas sedimentarias y posiblemente metamórficas. Para el sur peruano la presencia de rocas volcánicas recientes podría ser de gran interés en razón que estas pueden encubrir yacimientos más antiguos como es el caso de los volcánicos Barroso que se sabe ya, que presentan ventanas geológicas indicando centros de alteración hidrotermal debajo de ellos, aumentando así las posibilidades prospectivas en el sur del Perú.

5.2. Resultados y Discusión en Función del Primer Objetivo Específico

Para el yacimiento Pucamarca el fracturamiento regional del basamento precenozoico manifiesto como Sistema de Fallas

Incapuquio tuvo un papel fundamental en el desarrollo de la diatrema y posterior mineralización.

En el sector estudiado las evidencias de estas estructuras es clara, proponiendo que al final del ciclo orogénico andino en sus fases Quechua Uno y Quechua Dos (Mioceno-Plioceno) habría generado la formación de la diatrema contemporánea con la depositación de los volcánicos de la Formación Huaylillas.

Se interpreta que la interacción de los sistemas de fallas, Incapuquio, Suroeste-Noreste y Norte-Sur favorecieron los procesos dentro de la diatrema Pucamarca como se puede comprobar espacialmente en las diferentes direcciones de emplazamiento de unidades litológicas (pórfido de cuarzo, pórfido andesítico, tufo brecha, tufo fragmental y tufisita), alteración hidrotermal y mineralización, actividades desarrolladas en el tiempo que podría haber sido mayor a un millón de años.

Como se aprecia en las figuras 3 y 4 el arco magmático principal estuvo activo entre 5 y 25 M.a. en el Perú y entre Chile y Argentina, mostrando un desplazamiento de oeste a este pero siempre muy cerca de la Costa en el extremo sur del Perú, en parte motivado por un menor buzamiento de la Placa de Nazca en contacto con la placa Sudamericana.

Se piensa que la diatrema se formo contemporáneamente al ascenso del intrusivo pórfido de cuarzo acompañado de un proceso explosivo ácido en el cual se emplazan el tufo brecha, tufo fragmental y tufisita, poniendo así en marcha un flujo hidrotermal circulante en la diatrema a través de fracturas, en donde por pérdida de presión y temperatura estos fluidos precipitan parte de su carga silícea junto a oro y los otros elementos propios de este ambiente.

5.3. Resultados y Discusión en Función del Segundo Objetivo Específico

La intensa silicificación con generación de cuarzo poroso acompañado de alteración argílica y argílica avanzada indican condiciones ácidas a extremadamente ácidas de los fluidos respectivamente. Su presencia en el sistema hidrotermal que afecta a las rocas de la diatrema Pucamarca puede sugerir otras interpretaciones por lo que siempre será necesario una revisión de los depósitos epitermales en donde se muestran estas características. Como sabemos dentro de los sistemas epitermales existen dos estilos principales de mineralización en ambientes volcánicos: Baja y alta sulfuración. Estos términos fueron sugeridos sobre la base del estado de oxidación del azufre en el fluido (Hedenquist.J.W. 1995); baja sulfuración se refiere a la predominancia de especies reducidas de azufre (HS^- , H_2S), mientras que alta sulfuración a la presencia de componentes de azufre oxidado (HSO_4^- , SO_2). Así mismo fueron reconocidos depósitos con características intermedias por Hedenquist J. W. (2000). Los dos estilos principales se distinguen entre sí por presentar una disparidad química notable en el fluido mineralizante que produce diferente mineralogía de alteración y distinta localización de la mineralización económica dentro de cada sistema. En los de baja sulfuración el oro se encuentra en depósitos que van desde vetas a stockworks ó diseminado; mientras que en los sistemas de alta sulfuración el principal hospedante es un centro de alteración de sílice porosa residual (vuggy silica) que se puede apreciar en Pucamarca.

Para la formación de fluidos ácidos en los sistemas epitermales Hedenquist. (2000), propuso tres fuentes principales: Condensados magmáticos hipogénicos, oxidación de aguas calentadas por vapor y oxidación supergénica. Se postuló que la primera es responsable de la formación de alteración de argílica avanzada en litocapas estériles y en depósitos epitermales de alta sulfuración, mientras que las otras dos

pueden crear mantos de alteración argílica avanzada normalmente estériles sobre depósitos tanto de alta como de baja sulfuración.

La alteración argílica avanzada en Pucamarca se limita a los bordes de la diatrema coincidiendo con las zonas silicificadas controladas a su vez por la geometría de la propia diatrema; pero el dominio espacial de la intensa silicificación sobre los demás tipos de alteración es notoria e interpretada como producto de condensados magmáticos hipógenos propios de sistemas de alta sulfuración (Ph ácido).

5.4. Resultados y Discusión en Función del Tercer Objetivo Específico

El concepto más simple de diatrema es que es un conducto de emisión producido por una explosión volcánica, manifiesta como una brecha soportada por una matriz. Aparte del polvo de roca muchas brechas tienen en su matriz natural material tobáceo juvenil que es llamado tufisita (Pucamarca). Los clastos de estas brechas son heterolíticos y comprende todas las litologías conocidas en el entorno de una diatrema. Los clastos frecuentemente alcanzan más de un metro de diámetro y son subangulosos a redondeados.

En algunas diatremas se reconocen varias fases de brechas (Sillitoe, RH.1993) mostrando eventos más tardíos. Muchas diatremas tienen paredes inclinadas hacia adentro y varias de ellas tienen forma de embudo. Los contactos son generalmente abruptos y definidos por fallas anulares como se observa en Pucamarca (Fig. 16). La presencia del pórfido de cuarzo en la diatrema Pucamarca podría indicar que el canal alimentador de un domo a nivel más alto pero actualmente erosionado.

Las diatremas asociadas a depósitos epitermales de metales preciosos fueron emplazados antes que comenzara la mineralización, pero hay también casos que son intraminerales. La mineralización puede estar dentro y fuera de la diatrema como sucede en los yacimientos Pucamarca - Kelian Gold Mine y Marcapunta - Rosia Montana respectivamente, dependiendo de la permeabilidad. La alteración puede no tener relación con la mineralización. Siendo el estado de sulfuración diferente para los cuatro casos la mineralogía asociada es variable, entendiendo que el mecanismo a partir del cual se produjo la precipitación mineral, más en concreto, la existencia o no de ebullición; que para Pucamarca se pudo dar sobre la cota 4200 msnm como frente de deposición inicial; entre 4200 msnm y 4500 msnm un frente de máxima deposición y sobre esta cota un frente de deposición final concordante posiblemente a un paleocontacto entre los volcánicos Huilacollo y los volcánicos Huaylillas; contacto que podría también haber controlado el emplazamiento del pórfido de cuarzo explicando porque este intrusivo sobre la cota 4350 msnm toma una posición envolvente sobre la diatrema en dirección sureste-noroeste; sin olvidar además que la sílice masiva ocurre sobre la cota 4500 msnm, debido posiblemente a un nivel freático existente en el mismo contacto Huilacollo-Huaylillas. Similar situación podrían haberse dado en los demás yacimientos estudiados pues observamos que el cambio litológico sobre todo basamento-terciario, favoreció el emplazamiento de intrusiones y controló la alteración hidrotermal y deposición mineral.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

El yacimiento aurífero epitermal de Pucamarca emplazado en una diatrema, está relacionado espacial y temporalmente a rocas producto del vulcanismo terciario regional y local, sobreyacentes a rocas mesozoicas que conforman el basamento regional. Las intrusiones ígneas a las que se asocia la mineralización están controladas por el fracturamiento regional.

- Las características geológicas de éste yacimiento aurífero epitermal corresponden a las de un yacimiento epitermal de oro diseminado de alta sulfuración; que además está relacionado genéticamente con la formación de una diatrema, controlada estructuralmente por una falla regional.
- La litología asociada, la estructura y la mineralización de Pucamarca permiten relacionarla y compararla con otros yacimientos epitermales auríferos alojados en diatremas existentes en el Perú y el mundo, resaltando para el caso de yacimientos peruanos, la presencia de diatremas en diferentes contextos geológicos lo cual amplía formidablemente las posibilidades de descubrir nuevos yacimientos similares sobre todo en los bloques cenozoicos y mesozoicos.

- El Yacimiento Aurífero Pucamarca, fue descubierto en el año 2,001, dentro del programa de exploraciones en el sur del Perú, por parte de la empresa MINSUR SA (fig. 45).
- La diatrema como estructura controla el área mineralizada económica a nivel local. Regionalmente la Falla Incapuquio controla la ocurrencia de éste yacimiento y otros en el sur del Perú.
- La alteración hidrotermal muestra una distribución semicircular, con un núcleo intensamente silicificado, rodeado por un halo de alteración argílica avanzada (argílica-alunita), que grada a otro halo periférico de alteración argílica; a su vez es rodeado por un halo periférico de alteración propílica.
- La mineralización de oro en la fase de óxidos ocurre en forma diseminada como oro libre microscópico.
- La mineralización en la fase de sulfuros ocurre asociada a éstos, existiendo un incremento de valores en presencia de minerales de cobre.
- La correlación geoquímica indica una correlación directa con el arsénico, antimonio y mercurio (minerales de baja temperatura).
- Los mejores indicios de mineralizaciones epitermales auríferas en diatremas están distribuidos en toda el área Circun-Pacífica, del cual forma parte la Cordillera de los Andes Peruanos, en donde se han encontrado importantes yacimientos auríferos en ambientes parecidos; de allí su potencialidad para continuar con los trabajos exploratorios.

6.2. Recomendaciones

- En la medida que los trabajos de explotación vayan progresando se deberá continuar con los estudios geológicos del yacimiento, tanto a profundidad como en los alrededores.
- Para el caso del sur del Perú, las características geológicas de Pucamarca pueden servir de modelo para la ubicación de otros yacimientos similares, teniendo en cuenta que los volcánicos del

Grupo Barroso, podrían estar ocultando centros mineralizados; pues estos son de edad bastante reciente.

- Se debe estudiar las diatremas y su entorno geológico en los diferentes ambientes geológicos del Perú en razón de que los últimos descubrimientos no solo se están dando en ambientes volcánicos sino también en sedimentarios.
- La aplicación estricta del reglamento de manejo de impacto ambiental para una operación exploratoria, deberán continuar en los trabajos sucesivos del desarrollo de Pucamarca.
- Las relaciones sociales con las comunidades, excelentemente manejadas por la empresa MINSUR SA, deberá continuar con el objetivo de llevar progreso y desarrollo sustentado a las mismas.

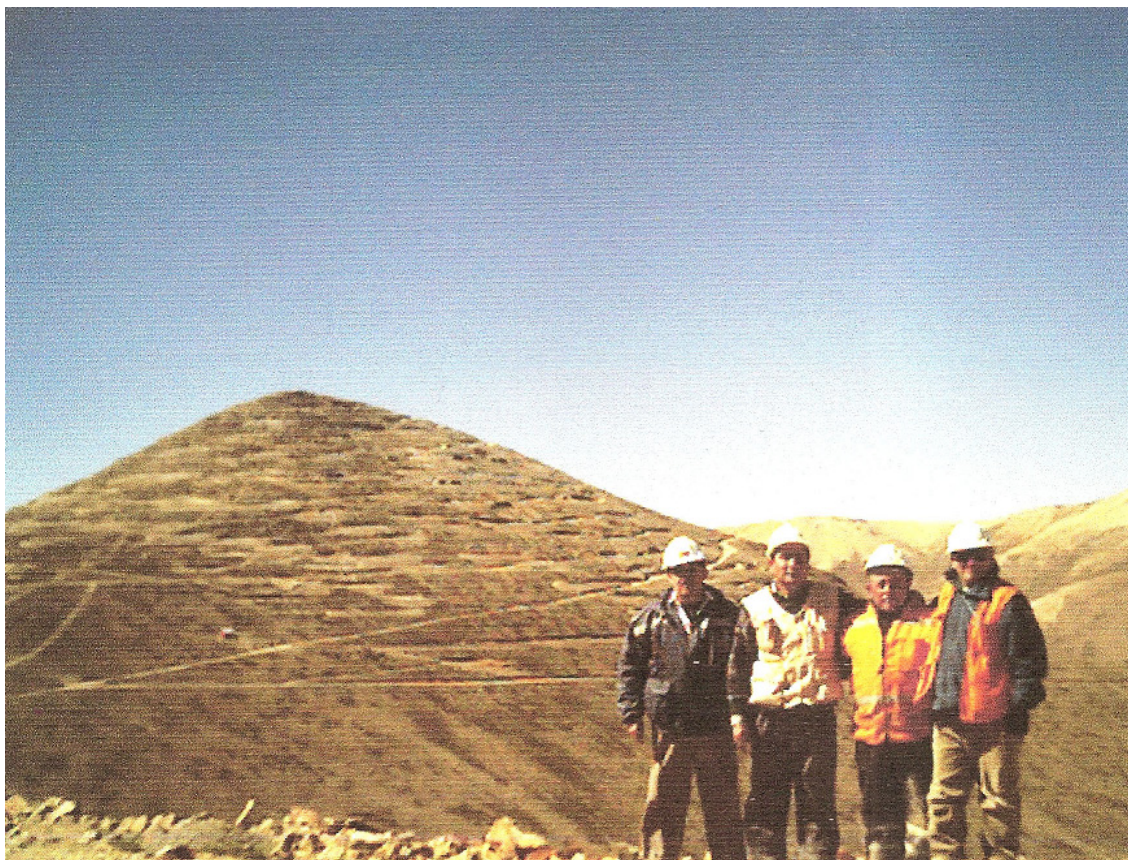


Fig. 45 – Equipo técnico que dirigió el proyecto Pucamarca, a la izquierda Ingeniero E. Lazo (GEOTEC), Ing. F. Cerón (Jefe de proyecto – MINSUR SA), Ing. E. Eguiluz (GEOTEC) e Ing. F. Cadenas (Asistente de proyecto –MINSUR SA). Al fondo a la izquierda cerro Checocollo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Calderón, Ángel. 1996.
Informe privado de CENTROMÍN PERÚ SA. Págs.24, 25 y 26.

- AMEC (Perú) S.A. 2006.
Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Pucamarca. Informe privado de MINSUR S.A., Págs. 1 a 200.

- Atkinson W; Skewes, Milka Alexandra y Stern, Charles. 2007.
Departamento de Geología. Universidad de Colorado en Boulder.
Seminario de Brechas Hidrotermales. CIP-Lima-Capítulo de Ingeniería Geológica, Págs. 1 a 131.

- Bradford, Jhon.1999.
Poracota: Un yacimiento Epitermal de Oro de alta sulfuración en el Sur del Perú. Pro EXPLO´ 99-Lima-Perú, v. Luis Hoshschild Plaut, Págs. 49 a 59.

- Cabello, José.1992
Metales preciosos y volcanismo cenozoico en los Andes Chilenos.
Revisión actualizada-Seminario Taller-Procesos Formadores de depósitos epitermales de metales preciosos-Santiago de Chile, Págs. 83 a 90.

- Camprubí, Antoni; Albinson, Tawn. 2006.
Depósitos epitermales en México: Actualización de su conocimiento y reclasificación empírica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
“Volumen conmemorativo del Centenario”. Revisión de algunas tipologías de Depósitos Minerales de México. Tomo LVIII, núm. 1, Págs. 27 a 81.

- Candiotti, Hugo y Guerrero, Tomás.1999.
Yacimiento Sipán: Exploración, Características Geológicas, Mineralógicas y Geoquímicas-Pro EXPLO´ 99-Lima Perú, v. Luis Hoshschild Plaut, Págs. 27 a 36.

- Davies, Andrew G.S.; Coolie, David R.; Gemmel, J. Bruce and Simpson, Kirstie A. 2008.
Diatreme Breccias at the Kelian Gold Mine, Kalimantan, Indonesia: Precursors to Epithermal Gold Mineralization. Society of Economic Geologist, Inc. Economic Geology, V. 103, Págs. 689 a 716.
- Davies, Andrew G.S; Cooke, David R; Gemmell, J.Bruce. 2008.
Hidrotermal Breccias and Veins at the Kelian Gold Mine, Kalimantan, Indonesia: Genesis of a Large Epithermal Gold Deposit. Society of Economic Geologist, Inc. Economic Geology, v. 103, Págs. 717 a 757.
- Flores Barrón, Ronald Eugenio. 2001
Aspectos Generales de la Geología del Yacimiento Aurífero de Quicay. Tesis de Ingeniero Geólogo, Universidad Nacional Álcides Carrión, Págs. 82 a 107.
- Gardeweg, Mayra.1992.
El volcanismo cenozoico superior del Norte de Chile: Una revisión de las formas volcánicas-Seminario Taller-Procesos Formadores de Depósitos Epitermales de Metales Preciosos-Santiago de Chile, Págs.. 73 a 82.
- Goff , Fraser and Gardner, Jamie.1991.
Evolution of a Mineralized Geothermal System, Valles Caldera, New Mexico-Economics Geology-Vol 89, Págs.1803 a 1832.
- Hedenquist, J.W. 1995, The ascent, of magmatic fluid: discharge versus mineralization, in Thompson, J.F.H. ed. Magmas, fluids and ore deposits: Mineralogical association of Canada Short Course, v.23, p.263-289.
- Hedenquist, J.W., Arribas, A.R., y González – Urien E., 2000. Exploration for Epithermal Gold Deposits. Review in Economic Geology, Special Issue on Gold Deposit, 7: 33p.

- Hernández Sampiere, R.; Fernández Collado, C.; Baptista Lucio, L...2006.
Metodología de la investigación-México, Págs.849.
- Heyl, David y Livingston, Wayne.1999.
El Yacimiento Tres Cruces y la Evolución de sus Modelos Genéticos de Geología Económica-Pro EXPLO' 99-Lima-Perú, v. Luis Hoshschild Plaut, Págs. 61 a 71.
- Loayza, Dante.2004.
Aruntani-Nuevo Gran Distrito Minero de tipo Epitermal Aurífero-En Mundo Minero, ed. 227, Pág.. 54.
- López, D y Olarte, J. 2001.
Evaluación Estadística de la Sismicidad en la Región Sur Occidental del Perú. CISMID/UNI.
Lima.Págs. 1 a 40.
- Mayta, Oscar.1999.
Yacimiento aurífero Chipmo-Pro EXPLO' 99-Lima-Perú, v. Luis Hoshschild Plaut, Págs.. 37 a 48.
- MINSUR SA.2006.
Informe privado.
- Newhall, Christopher and Dzurisin.1855
Historical Unrest at Large Calderas of the World-U.S. Geological Survey Bulletin, v. 1, Pág. 9.
- Ocharan, Gladys. 2003.
Estudio petrográfico, mineralógico y microanalítico de cuatro muestras, MNº-1, MNº-2, DDH-29 (206-208m), DDH-45 (157.50m). MINSUR SA.
Págs.1 a 11.

- Ocharan, Gladys. 2005.
Estudio mineralógico de la muestra DDH-130 (210.50m).MINSUR SA.
Págs.1 a 6.
- Petersen, U.1999
Magmatismo y Yacimientos Hidrotermales en los Andes Centrales-Pro
EXPLO´ 99-Lima-Perú, v. Luis Hoshschild Plaut, Págs.. 5 a 12.
- Rytuba, James.1994
Evolution of volcanic and tectonic features in caldera settings and their
importance the localization of ore deposits-Economics Geology-vol.89
Págs.. 1687 a 1696.
- Sillitoe, RH.1993.
Epitermal Models: genetic tipos, geometrical controls and shallows
features, en kirkam, R.V,Sinclair, WD., Thorpe, R.I, Duke,
J.M.(eds.),Mineral Deposit Modeling: Geological Association of Canadá
Special Paper,40,403-417.
- Tumialán de la Cruz;P.H..2003.
Compendio de yacimientos minerales del Perú. Boletín No 10-Serie B:
Geología Económica.INGEMMET.Págs.619.
- Vidal, César E; Ligarda, Rolando. 2004.
Depósitos de Enargita-Au en Marcapunta, Distrito Minero Colquijirca,
Perú Central: Zonamiento mineralógico y geoquímica en depósitos de
reemplazamiento en calizas subvolcánicas tipo epitermal de alta
sulfuración. XII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos.
Sociedad Geológica del Perú. pags. 743 a 791.
- Vidal, César E. 2008
Comunicación personal.

- Volfson, F. y Yakovlev, P. 1982.
Estructuras de los Campos y Yacimientos Metalíferos-Editorial MIR-Moscú-MIR. Págs. 86 a 94.
- Volkert, Craig David, Mc Ewan, J.A., y Garay, Enrique.1999.
Pierina Au-Ag Deposit Cordillera Negra North-Central Perú-Pro EXPLO' 99-Lima-Perú, v. Luis Hoshschild Plaut, Págs.. 23 a 25.
- Wallier, Stefan; Rey Roger; Kouzmanov, Kalin; Pettke,Thomas. 2006.
Magmatic Fluids in the Breccia Hosted Epithermal Au-Ag Deposit of Rosia Montana, Romania. Society of Economic Geologist, Inc.Economic Geology, v. 101. Págs..923 a 954.
- White, Noel C.; Hedenquist, Jeffrey W. 1995.
Yacimientos Epitermales de Oro, estilos, características y exploración. Publicación en: SEG Newsletter, N° 23, Octubre 1995. Traducido por Alberto Pool. 1996, Págs.. 1 a 13.